STUDIO CONOSCITIVO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI E DI ALCUNI LORO IMPATTI IN FRIULI VENEZIA GIULIA

PRIMO REPORT – marzo 2018

Supporto alla predisposizione di una strategia regionale di adattamento ai cambiamenti climatici e per le azioni di mitigazione

in collaborazione con

Studio conoscitivo dei cambiamenti climatici e di alcuni loro impatti in Friuli Venezia Giulia

STUDIO CONOSCITIVO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI E DI ALCUNI LORO IMPATTI IN FRIULI VENEZIA GIULIA

PRIMO REPORT – marzo 2018

Supporto alla predisposizione di una strategia regionale di adattamento ai cambiamenti climatici e per le azioni di mitigazione

a cura di

ARPA FVG

Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente
del Friuli Venezia Giulia

in collaborazione con

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

ICTP International Centre for Theoretical Physics

CNR – ISMAR Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze Marine

OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

Università degli Studi di Trieste

Università degli Studi di Udine

Marzo 2018 (ultima revisione 13/09/2018)

Coordinamento generale:

Federica Flapp, Stefano Micheletti

Coordinamento editoriale:

Renato R. Colucci, Federica Flapp, Valentina Gallina, Arianna Peron

Elaborazione grafica:

Federica Flapp, Valentina Gallina, Michela Mauro

Autori dei contributi tecnico-scientifici delle sezioni dell'opera:

parte 1 – I CAMBIAMENTI CLIMATICI IN FVG

Andrea Cicogna, Renato R. Colucci, Federica Flapp, Valentina Gallina, Filippo Giorgi, Stefano Micheletti, Fabio Raicich, Stefano Salon, Cosimo Solidoro

parte 2 – RICOGNIZIONE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: dai documenti nazionali alle prime considerazioni per il FVG

Alessandro Acquavita, Giorgio Alberti, Giovanni Bacaro, Franca Battigelli, Nicola Bettoso, Massimo Buccheri, Ivonne Caliz, Anna Carpanelli, Marco Carpona, Andrea Cicogna, Flavio Cimenti, Luca Della Vedova, Federica Flapp, Valentina Gallina, Paolo Glerean, Arianna Macor, Paolo Maddaleni, Francesco Marangon, Stefano Martellos, Claudia Meloni, Rossella Napolitano, Andrea Peresson, Lucia Piani, Gabriele Piazza, Erica Rancati, Luca Scoria, Nicola Skert, Alessandra Sinesi, Paolo Sivilotti, Francesca Tassan, Enrico Tordoni, Marco Valecic, Giada Venier, Sandro Venturini, Pierluigi Verardo, Damiano Virgilio, Elisa Zanut, Raffaella Zorza

parte 3 – CASI STUDIO SUGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI IN FVG

Giorgio Alberti, Stefano Barbieri, Francesco Boscutti, Enrico Braidot, Valentino Casolo, Andrea Cicogna, Mattia Cleva, Francesco Danuso, Paola Del Negro, Annalisa Falace, Valentina Gallina, Dario Giaiotti, Elena Gianesini, Filippo Giorgi, Daniela Iervolino, Andrea Nardini, Paolo Olivo, Arturo Pucillo, Fabio Raicich, Stefano Salon, Cosimo Solidoro, Mauro Spanghero, Fulvio Stel, Emilio Tibaldi, Francesca Tulli, Marco Zancani, Michele Zuppichin

Questo studio è stato promosso dalla Regione autonoma Friuli Venezia Giulia - Assessorato all'ambiente ed energia e finanziato con deliberazione della Giunta regionale n. 1890 del 7.10.2016.

INDICE

INTRODUZIONE GENERALE

Federica Flapp, Stefano Micheletti - ARPA FVG, s.o.c. OSMER e GRN

I cambiamenti climatici sono oggi un tema prioritario che coinvolge scienza, società e politica: sono infatti uno dei settori interconnessi oggetto dell'*Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite (Obiettivo 13 Agire per il clima: Promuovere azioni, a tutti i livelli, per combattere il cambiamento climatico)* e, in Italia, della *Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile 2017-2030* e l'attenzione pubblica sulla questione è molto cresciuta negli ultimi anni.

L'evidenza scientifica dell'entità del riscaldamento globale si è andata sempre più consolidando negli ultimi anni, così come la consapevolezza che a causarlo sono le emissioni di gas climalteranti derivanti dall'impiego dei combustibili fossili e dall'uso non sostenibile del territorio e delle risorse naturali. Il V rapporto sul clima (AR5) dell'IPCC - *International Panel on Climate Change* - completato nel 2014 e basato su conoscenze e strumenti ulteriormente evoluti rispetto al precedente AR4 del 2007, afferma in modo molto netto che *"il riscaldamento del sistema climatico è inequivocabile e, dal 1950, molti dei cambiamenti osservati sono senza precedenti nei decenni e nei millenni. L'atmosfera e l'oceano si sono riscaldati, la massa di neve e ghiaccio è diminuita, e il livello del mare è aumentato. L'influenza umana sul sistema climatico è chiara e le recenti emissioni antropogeniche di gas ad effetto serra sono le più alte nella storia. I recenti cambiamenti climatici hanno avuto impatti diffusi sui sistemi umani e naturali"*.

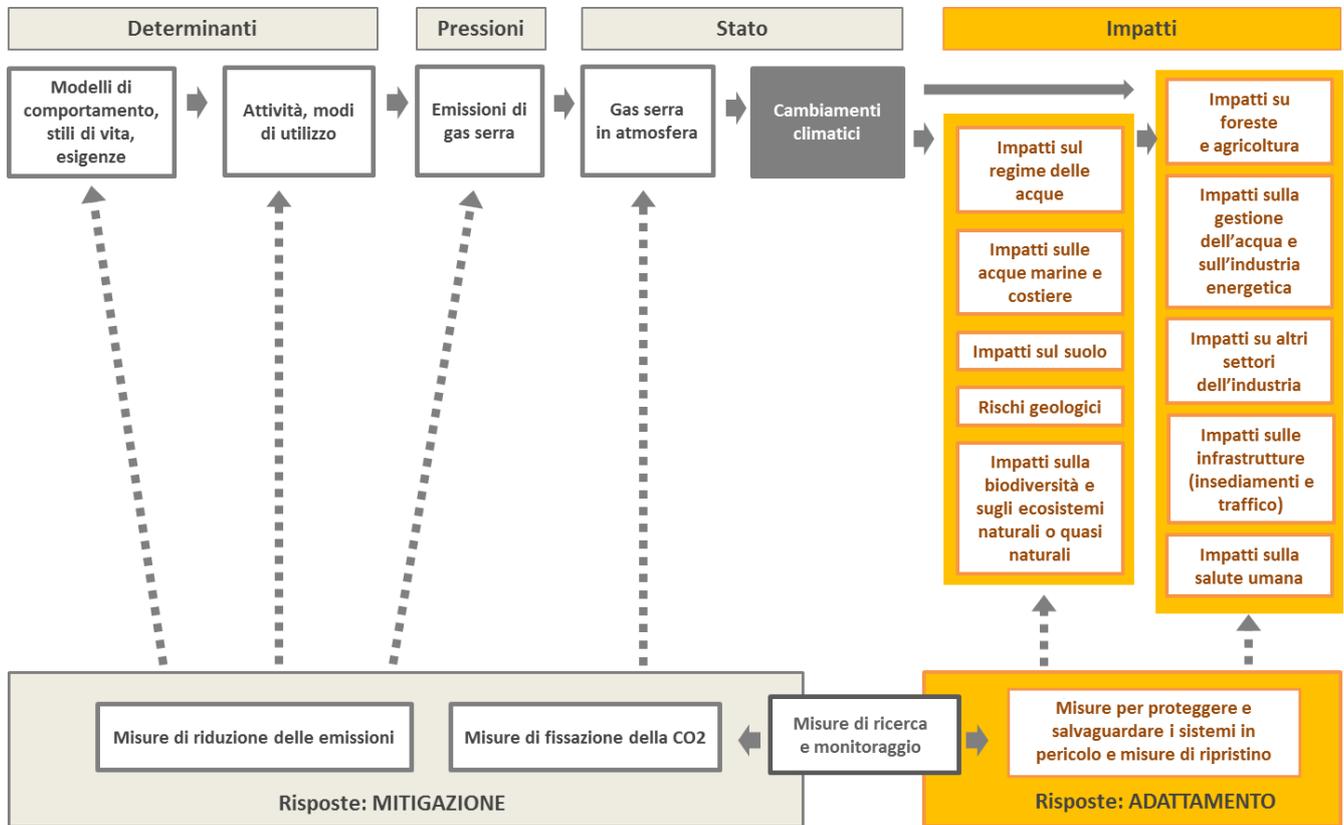
Di pari passo è cresciuta la consapevolezza della necessità di porre in atto sia politiche globali per ridurre drasticamente le emissioni e mitigare l'aumento delle temperature (*mitigazione*), sia strategie di *adattamento* per limitare gli impatti dei cambiamenti climatici che comunque si verificheranno. Su questi fronti, tappe fondamentali a livello internazionale sono state la *Strategia Europea di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* del 2013 e *l'Accordo di Parigi* del 2015 (in vigore da novembre 2016). Anche nel nostro Paese e nella nostra Regione lo studio dei cambiamenti climatici e la messa a punto di politiche di mitigazione e adattamento hanno conosciuto negli ultimi anni sviluppi significativi.

A livello nazionale, l'evoluzione del clima è oggetto degli studi sulle evidenze e le tendenze del clima in Italia condotti da ISPRA - *Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale* - e SNPA – *Sistema Nazionale per la Protezione Ambientale*. Sul fronte delle politiche climatiche, nel 2015 il Ministero dell'Ambiente ha approvato la *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNAC) e nel 2017 ha sottoposto a consultazione pubblica il *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* elaborato dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC).

Coerentemente con le politiche europee e nazionali, la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia ha intrapreso il proprio percorso verso una *Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*, affidando ad ARPA FVG (con DGR n. 1890-2016) lo studio delle evidenze dei cambiamenti climatici sul territorio della regione e l'analisi dei loro impatti. Lo studio è condotto da ARPA, che tramite la propria struttura dell'OSMER fornisce da anni dati, statistiche e informazioni di vario tipo sul clima della regione, con la collaborazione scientifica delle Università degli Studi di Udine e di Trieste e di enti pubblici di ricerca aventi sede in regione: l'International Centre for Theoretical Physics (ICTP) – Centro Internazionale di Fisica Teorica, l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) e il Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto di Scienze Marine (CNR_ISMAR) U.O.S. di Trieste.

Cambiamenti climatici: uno sguardo d'insieme a un problema complesso

Il cambiamento climatico in atto dipende in larga misura da cause globali rilevate e rese note dall'IPCC. Per comprendere la complessità del problema e rappresentarlo in un'ottica sistemica che metta in relazione cause, effetti e possibili soluzioni, è utile inquadrare i cambiamenti climatici secondo il *modello DPSIR* (fig. A), sviluppato dalla AEA (Agenzia Europea per l'Ambiente). Questo schema evidenzia i nessi causali fra attività antropiche (cause determinanti e conseguenti pressioni), stato dell'ambiente e impatti associati, nonché le azioni (risposte) che si possono mettere in atto per fronteggiare il problema.

fig. A – Cause, effetti e risposte ai cambiamenti climatici: schema concettuale secondo il modello DPSIR (Driving Force - Pressure - State - Impact - Response). Fonte: Umweltbundesamt, 2015. Traduzione e rielaborazione a cura di ARPA FVG

Le cause del cambiamento climatico, così come definite nell'AR5 (IPCC, 2014), sono le sostanze e i processi naturali e antropogenici che alterano il bilancio energetico della Terra, portando ad un assorbimento di energia da parte del sistema climatico con un conseguente riscaldamento della superficie terrestre (il cosiddetto "effetto serra"). Il più grande contributo a questo processo è stato l'enorme aumento della concentrazione atmosferica di CO_2, il gas serra più abbondante, dal 1750 ad oggi. L'influenza umana sul sistema climatico è chiara e le continue emissioni di gas serra causeranno un ulteriore riscaldamento (maggiore di 1,5 °C rispetto al periodo pre-industriale per la fine del XXI secolo) e cambiamenti in tutte le componenti del sistema climatico (atmosfera, ciclo dell'acqua, innalzamento del livello del mare, precipitazioni, eventi estremi), aumentando la probabilità di effetti gravi, diffusi e irreversibili per le persone e gli ecosistemi.

Gli impatti rappresentano le conseguenze dirette e indirette dei cambiamenti climatici sul sistema e includono, ad esempio, impatti sul regime delle acque interne e delle acque marine costiere, sul suolo, sulla biodiversità, ma anche su molteplici settori socioeconomici (es. agricoltura, allevamento, infrastrutture, turismo, salute).

Due sono le possibili strategie di risposta al cambiamento climatico: la **mitigazione** e l'**adattamento**, entrambe necessarie e complementari, che chiamano in causa diversi livelli di *governance.*

Come affrontare i cambiamenti climatici su scala globale e locale

Come evidenzia il V Rapporto dell'IPCC, contenere il cambiamento climatico richiede una riduzione sostanziale e duratura delle emissioni di gas a effetto serra che, insieme con l'adattamento, può essere in grado di limitare i rischi e aumentare la resilienza dei sistemi naturali e socioeconomici. Molte scelte di **adattamento** e di **mitigazione** possono contribuire a contrastare i cambiamenti climatici, ma nessuna opzione singola è sufficiente di per sé: sono necessarie politiche e cooperazione a tutti i livelli, che forniscano risposte integrate collegando l'**adattamento** e la **mitigazione** con altri obiettivi sociali in un'ottica di sviluppo sostenibile.

Se la **mitigazione** ha effetti globali e deve necessariamente essere oggetto di politiche internazionali, l'**adattamento** è una partita che si gioca a scala nazionale e ancor più regionale: ogni territorio ha infatti specifiche vulnerabilità, subisce diversamente gli impatti dei cambiamenti climatici e può diversamente trarre vantaggio dalle opportunità che questi possono offrire. Ne consegue che le strategie di adattamento devono essere contestualizzate e riferite a specifici scenari climatici regionali.

Coerentemente con queste premesse, la Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia da un lato è impegnata sul fronte della mitigazione tramite il *Piano energetico regionale* (RAFVG, 2015) che persegue sviluppo e potenziamento del sistema energetico in FVG insieme alla riduzione delle emissioni climalteranti, secondo i principi dell'Accordo di Parigi; dall'altro ha intrapreso il proprio percorso verso una *Strategia Regionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*, di cui questo studio costituisce il primo passo.

Questo percorso di conoscenza comprende anche ulteriori attività di comunicazione e di informazione al pubblico, oltre a quelle che ARPA FVG – OSMER sta già mettendo in campo da anni attraverso incontri con le scuole e con la cittadinanza, nonché tramite i diversi canali di comunicazione (sito web, social networks, trasmissioni radio-televisive ecc.) per sensibilizzare la popolazione e stimolare l'adozione di comportamenti e iniziative idonei a contrastare i cambiamenti climatici.

Lo *Studio conoscitivo* da un lato analizza i cambiamenti del clima in Friuli Venezia Giulia, dall'altro pone le basi per comprendere i loro impatti sul territorio regionale. L'analisi climatica riguarda non solo i cambiamenti climatici già in atto, ma anche – ed è questa una novità assoluta per la nostra regione - i cambiamenti climatici futuri: infatti, grazie alla collaborazione con l'ICTP è stato possibile **per la prima volta ottenere una stima di come potrà cambiare il clima in futuro in Friuli Venezia Giulia** utilizzando le simulazioni di alcuni modelli climatici europei, che sono state "ritagliate" su misura per il territorio regionale.

Come è articolato e impostato lo studio

Lo studio si articola in tre parti:

1. prima parte: **variabilità climatica** presente e passata (dati storici, a cura di ARPA FVG - Osmer) e futura (proiezioni climatiche, per la prima volta disponibili per il FVG, a cura di ICTP), incluse le variazioni della criosfera e del livello del mare (a cura di CNR-ISMAR);
2. seconda parte: **ricognizione degli impatti dei cambiamenti climatici descritti a livello nazionale** da SNACC e PNACC, per iniziare a fare alcune considerazioni sulla rilevanza dei diversi impatti per il Friuli Venezia Giulia (a cura di ARPA FVG e Università di Udine, con la collaborazione di alcuni soggetti del territorio per focus specifici);
3. terza parte: approfondimenti su alcuni impatti settoriali (risorse idriche, biodiversità/ecosistemi, produzione primaria) attraverso alcuni **casi di studio** (a cura di Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, ARPA FVG, CNR-ISMAR, OGS, Università degli Studi di Udine, Università degli Studi di Trieste).

Lo **scopo dello studio** è produrre conoscenza utile per le successive politiche climatiche in regione (si inserisce infatti nelle attività svolte da ARPA FVG quale *supporto alla predisposizione di una strategia regionale di adattamento ai cambiamenti climatici e per le azioni di mitigazione*), ma anche illustrare le criticità degli effetti dei cambiamenti climatici alla cittadinanza.

Diversi sono gli enti e le organizzazioni che da anni sviluppano ricerca e producono conoscenza sui cambiamenti climatici relativamente al territorio regionale, così come articolate sono le strutture specializzate che nell'ambito di ciascun ente studiano specifici aspetti di questa complessa tematica (es. Servizi dell'Amministrazione regionale, Dipartimenti universitari, sezioni degli enti di ricerca). Già in alcuni casi, studi settoriali erano stati sviluppati grazie alla collaborazione di enti diversi, come ad esempio nel caso dello studio sugli *"Impatti dei cambiamenti climatici sul territorio fisico regionale"* (RAFVG, 2015) sviluppato dalla Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia e dal Dipartimento di Matematica e Geoscienze dell'Università degli Studi di Trieste.

Con il percorso avviato nel 2017 sui cambiamenti climaticiin FVG si è quindi inteso avviare la creazione di uno spazio comune di condivisione e raccordo tra una molteplicità di enti e organizzazioni, per poter offrire congiuntamente le conoscenze via via prodotte ai decisori politici, ai portatori di interesse dei vari settori socio-economici e alla cittadinanza. Per come è stato impostato questo primo studio, in base al mandato regionale (DGR n 1890-2016), il report non ha valenza di documento a carattere pianificatorio e non ha pretese di esaustività: è stato necessario compiere varie scelte delle tematiche da trattare e dei corrispondenti referenti, con conseguente coinvolgimento, per ora, di alcune delle strutture degli enti di ricerca presenti in FVG.

Un importante risultato raggiunto consiste proprio nella creazione di un tavolo comune di confronto e collaborazione sulla tematica, che ha visto partecipare tutte le principali realtà di ricerca del FVG. Il **taglio editoriale complessivo** quindi, pur includendo in alcune parti testi e grafici necessariamente complessi, non è quello di una pubblicazione prettamente scientifica, né quello di un atto politico-istituzionale, ma quello di un documento che fornisca, attingendo da solide basi tecnico-scientifiche, informazioni utili e comprensibili ai decisori, ai portatori di interesse e ai cittadini del Friuli Venezia Giulia attenti alle tematiche trattate.

Bibliografia

ARPA FVG – *OSMER, Il clima del Friuli Venezia Giulia*, http://www.meteo.fvg.it/clima/clima_fvg/02_documenti_descrittivi_e_approfondimenti/01_Il_clima_del_Friuli_Venezia_Giulia/clima_fvg-divulgativo.pdf, ultimo accesso 08/09/2017

IPCC, 2014, *Fifth Assessment Report (AR5)*, https://www.ipcc.ch/report/ar5/, ultimo accesso 08/09/2017

ISPRA, 2015, *Il clima futuro in Italia: analisi delle proiezioni di modelli regionali. Stato dell'Ambiente 58/2015,* Roma

ISPRA, 2017, *Gli indicatori del clima in Italia nel 2016. Rapporto ISPRA Stato dell'ambiente 72/2017*, Roma

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015, *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*, Roma

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2017, *Strategia Nazionale per lo Sviluppo Sostenibile 2017-2030*, Roma

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2017, *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (bozza per la consultazione pubblica)*, http://www.minambiente.it/pagina/consultazione-su-piano-nazionale-adattamento-cambiamenti-climatici, ultimo accesso 08/09/2017

ONU, *Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite - Obiettivo 13 Agire per il clima: Promuovere azioni, a tutti i livelli, per combattere il cambiamento climatico*, http://www.unric.org/it/agenda-2030/30796-obiettivo-13-promuovere-azioni-a-tutti-i-livelli-per-combattere-il-cambiamento-climatico, ultimo accesso 08/09/2017

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015, *Piano energetico regionale*, http://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/energia/FOGLIA111/, ultimo accesso 08/09/2017

RAFVG, 2015. *Impatti dei cambiamenti climatici sul territorio fisico regionale. Relazione di sintesi, Studio corredato da cartografia e relazione di sintesi geologica e geotematica sullo stato di fatto concernente la conoscenza d'insieme del territorio fisico regionale per la valutazione degli impatti dovuti ai cambiamenti climatici.*

SNPA, 2017, *Introduzione agli indicatori di impatto dei cambiamenti climatici: concetti chiave e indicatori "candidati"*, Prodotto del GdL 7.45 Impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Roma

Umweltbundesamt, 2015, *Evaluation of the German Strategy for Adaption to Climate Change (DAS) – Reporting and Closing Indicator Gaps*, München (Germania)

UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2015, *Paris Agreement*, http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php, ultimo accesso 08/09/2017

Parte 1
I CAMBIAMENTI CLIMATICI IN FRIULI VENEZIA GIULIA

1.1 Variabilità climatica passata e presente

Andrea Cicogna, Federica Flapp, Stefano Micheletti
ARPA-FVG – S.O.C. Osmer

I fattori che influenzano il clima regionale

La regione Friuli Venezia Giulia è caratterizzata da una posizione geografica e da un'orografia che ne condizionano in modo determinante la meteorologia e quindi il clima.

Infatti, la regione è situata alle medie latitudini, dove è molto marcato il contrasto tra le masse d'aria polare e tropicale: tale contrasto genera frequentemente delle perturbazioni dello stato normale dell'atmosfera.

Inoltre il Friuli Venezia Giulia fa parte di quelle regioni, orograficamente complesse, dove i processi di formazione delle perturbazioni e la loro evoluzione sono influenzati fortemente dai rilievi: nello specifico è la catena alpina che modula in modo molto marcato la circolazione atmosferica con effetti sia sulle temperature che sulle piogge.

Le Alpi impediscono il flusso da nord di masse d'aria particolarmente fredde e in tal senso operano un'azione mitigatrice di grande entità, specie sulle temperature minime invernali. Si pensi ad esempio che la temperatura media minima a gennaio in una località quale Lubiana, posta in una regione contermine con altitudine e latitudine (384 m.s.l.m, latitudine 46°22' N) quasi paragonabili a quelle di Gemona del Friuli (215 m.s.l.m, latitudine 46°15' N), è di -4 °C, contro -1 °C della località friulana. Questa differenza di 3° C può essere attribuita al massimo per un terzo alla lieve differenza di quota delle due stazioni di misura, la parte rimanente è dovuta alla diversa localizzazione rispetto alla catena alpina.

Le Alpi costituiscono poi una barriera ai flussi umidi provenienti da sud ovest e sud est, che sono tipici della meteorologia regionale, determinando un incremento notevole delle piogge, sia in termini quantitativi che di frequenza, rispetto ad altre zone del nord Italia.

Molto importante nel modulare il clima regionale risulta la presenza dal Mare Adriatico. Il mare tende a mitigare le temperature: gli estremi si smorzano, per cui le aree litoranee rispetto a quelle della pianura interna presentano temperature medie più elevate in inverno e più basse in estate. È tuttavia da notare che l'Alto Adriatico è un bacino relativamente poco profondo e questo elemento fa sì che durante l'inverno la massa d'acqua si raffreddi parecchio e che d'estate si riscaldi notevolmente. Di conseguenza gli effetti di mitigazione degli estremi termici invernali ed estivi sono contenuti.

Molto importante è invece il contributo all'incremento delle piogge (sia quelle temporalesche estive che quelle di flusso autunnali e primaverili) determinato dalla cessione di umidità dal mare alle masse d'aria che transitano sull'Adriatico prima di investire il Friuli Venezia Giulia.

Fonti dei dati

I dati su cui si basano le elaborazioni e le mappe qui riportate sono stati raccolti dalle seguenti tipologie di stazioni di misura:

- meteorologiche sinottiche, attivate dall'ERSA tra il 1990 e il 1997 e ora confluite nella rete meteorologica della Regione Friuli Venezia Giulia gestita dalla Protezione Civile regionale, per il periodo dall'attivazione ad oggi;
- termopluviometriche e pluviometriche del Servizio Idrografico dello Stato, di cui sono stati utilizzati i dati dal 1961 ad oggi, e ora confluite nella rete meteorologica della Regione Friuli Venezia Giulia gestita dalla Protezione Civile regionale;
- pluviometriche di regioni contermini, per il periodo 1961-2015.

Stato delle principali grandezze climatiche

Temperatura

La temperatura media annua in regione registra i valori massimi (14.5 °C – 15.5 °C) lungo la fascia costiera, grazie all'azione mitigatrice del mare.

In tutta la pianura friulana, le temperature risultano abbastanza omogenee, con valori medi annui compresi tra 13 °C e 14 °C, con alcune lievi differenze dovute sostanzialmente a posizione ed esposizione (fig. 1.1.1).

Il discorso si complica notevolmente per il resto del territorio collinare e montuoso della regione, dove la temperatura è profondamente influenzata non solo dall'altitudine ma soprattutto dall'esposizione e dall'orientamento delle catene montane delle Prealpi e Alpi Carniche e Giulie, dalla presenza dell'altopiano del Carso, dall'appartenenza ai sistemi idrografici (Adriatico e Mar Nero) ed ai bacini fluviali (Piave, Livenza, Tagliamento, Isonzo, Drava, Timavo), dalla conformazione delle valli.

fig. 1.1.1 - Friuli Venezia Giulia - Temperature medie annue (dati rete meteorologica regionale 1993-2013). Le cifre in rosso corrispondono a stazioni in quota, i valori riportati in nero corrispondono a stazioni di valle/pianura/costa. Fonte: ARPA-OSMER.

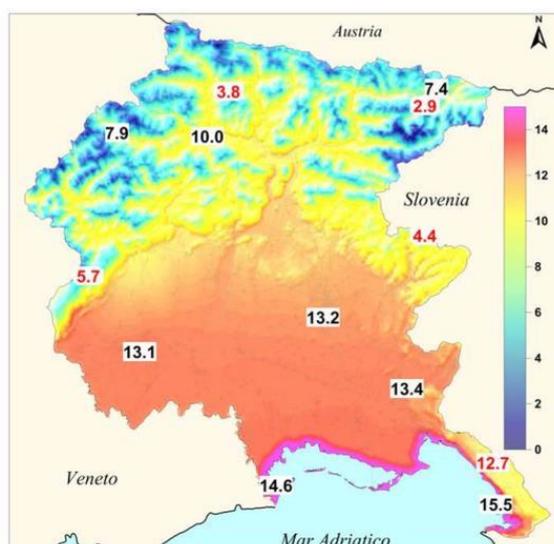
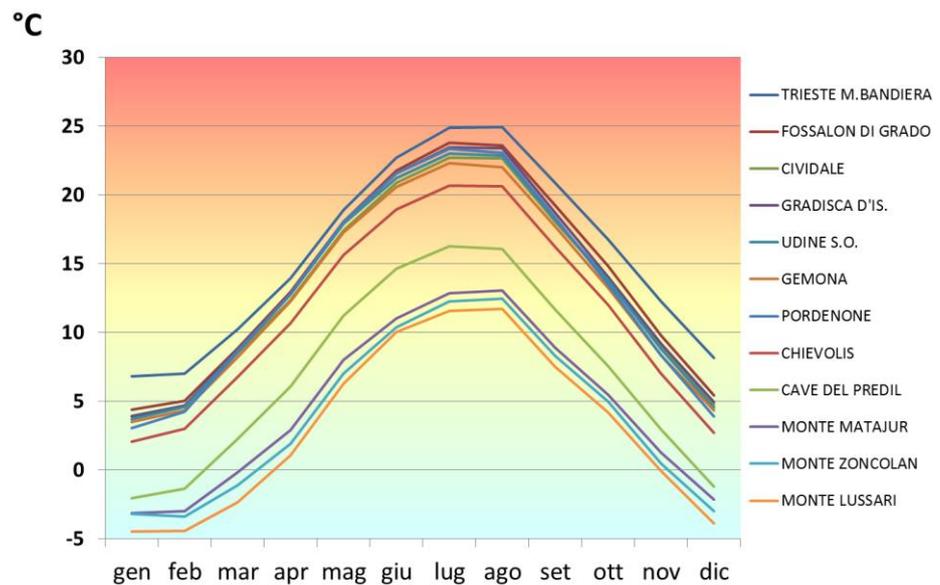



fig. 1.1.2 - Andamento della temperatura media mensile in diverse località nel corso dell'anno (dati rete meteorologica regionale 1991-2010). Fonte: ARPA-OSMER.

Considerando le temperature medie mensili, l'andamento annuale delle temperature registra in generale i valori massimi nei mesi di luglio e agosto e i valori minimi tra dicembre e febbraio (fig. 1.1.2), con una differenza media di circa 12-13 °C tra i valori delle località più calde e quelli dei siti più freddi.

In altre parole, oltre alla consueta diminuzione progressiva della temperatura legata alla quota (circa 0,7 °C ogni 100 m[1]), non sempre omogenea a causa dell'esposizione e dell'orientamento del versante, contano molto anche la giacitura e le caratteristiche orografiche di una località (es. valle larga o stretta) e l'altezza delle catene montane circostanti, che favoriscono il ristagno delle masse d'aria più fredde (fenomeno noto come "inversione termica"). Per esemplificare, le località poste in zone collinari o comunque non a fondovalle registrano temperature medie più elevate di quelle poste a fondovalle; il fenomeno era noto già nell'antichità e infatti la maggior parte degli insediamenti abitativi (castelli, borghi, villaggi montani) si è sviluppata su zone rilevate.

L'appartenenza ai sistemi idrografici e ai bacini fluviali incide notevolmente per gli effetti di maggiore o minore continentalità, perché l'esposizione all'afflusso delle diverse masse d'aria, calda o fredda, che si spostano sull'Europa influenza non solo le temperature medie, ma anche l'escursione termica diurna e annuale.

L'orientamento e la morfologia delle due catene montuose principali, le Alpi e Prealpi Carniche e Giulie, e il Carso, incrementano o smorzano l'azione dei flussi apportatori di diverse condizioni meteorologiche, quindi giocano un ruolo molto rilevante anche sul comportamento della temperatura nel lungo periodo.

Precipitazioni

Per quanto riguarda la pluviometria il Friuli Venezia Giulia può essere, in buona misura, diviso in 4 zone (fig. 1.1.3) che presentano regimi distinti:

1. Fascia costiera: è la zona meno piovosa della regione; i totali annui raggiungono mediamente i 1.000-1.100 mm, con un andamento crescente dalla costa verso l'interno;

[1] questo valore rispecchia il decremento della temperatura che si verifica nella troposfera secondo il gradiente adiabatico umido

2. Fascia pianura e colline: avvicinandosi alle montagne la piovosità aumenta; i valori medi annui variano da 1.200 a 1.800 mm;
3. Fascia prealpina: le precipitazioni medie annue raggiungono valori (dai 2.500 ai 3000 millimetri) da primato europeo;
4. Fascia alpina interna: a Nord delle Prealpi Carniche e Giulie la piovosità media annua torna a decrescere fino a valori di 1.400 – 1.600 mm, molto simili a quelli
   della media pianura.

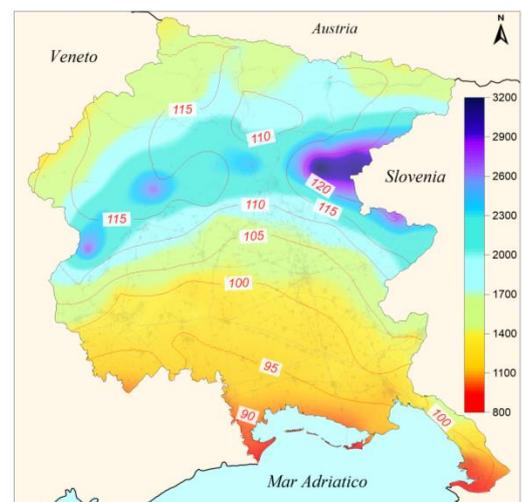
Per quanto riguarda la distribuzione delle piogge nell'arco dell'anno in tutta la regione il mese mediamente meno piovoso è febbraio, con valori che variano dai 60-90 mm di pioggia sulla costa e in pianura, ai 120-140 mm nella zona prealpina. Durante la primavera le piogge man mano aumentano fino a raggiungere a giugno un primo picco (90 mm sulla costa e 280 mm sulle Prealpi Giulie). A luglio le piogge diminuiscono per poi risalire nuovamente a partire dalla terza decade di agosto. La stagione autunnale è decisamente la più piovosa e i dati medi mensili di precipitazione a novembre variano dai 100 mm della costa ai 400 mm di Uccea.

fig. 1.1.3- Friuli Venezia Giulia - Precipitazioni medie annue (falsi colori) e numero di giorni piovosi medi annui (isolinee). (Dati rete meteorologica regionale 1961-2010).

Le variazioni intorno ai valori medi sopra riportati sono notevoli: ad esempio nel 1965 si sono avuti livelli di precipitazione mensile elevatissimi, che sono variati dai 300-400 mm sulla costa agli oltre 1.200 mm registrati sulle Prealpi Giulie (stazione di Oseacco) e sulle Prealpi Carniche (stazione di Barcis); per contro, proprio il mese successivo, ottobre 1965, è stato completamente secco con zero millimetri di precipitazione misurata.

Per quanto riguarda fenomeni di pioggia intensa a livello giornaliero, considerando tempi di ritorno dell'ordine dei 20 anni, i livelli di piovosità massima giornaliera raggiungibili variano statisticamente dai 100-200 mm sulla costa e in pianura, ai 300-400 mm nella zona prealpina ove localmente ogni vent'anni si possono registrare precipitazioni giornaliere di oltre 500 mm. Per fare un esempio, si possono ricordare la pioggia di 543 mm il 14/11/1969 a Oseacco (Prealpi Giulie) e quella di 500 mm il 2/9/1965 a Barcis.

La natura e l'origine delle piogge, ovviamente, variano nel corso dell'anno: durante i mesi tardo autunnali, invernali e primaverili le piogge sono in genere legate alla circolazione sinottica[2] e ai flussi umidi meridionali; durante i mesi estivi e nei primi mesi autunnali diventa rilevante o anche prevalente il contributo alla piovosità totale di piogge di origine convettiva (rovesci e temporali) o comunque legate a dinamiche alla mesoscala[3].

Oltre che i quantitativi è importante analizzare la frequenza delle precipitazioni e quindi il numero medio di giorni piovosi (o nevosi) registrati in regione. Si ricorda che da un punto di vista climatologico viene considerato piovoso il giorno in cui si è registrata una pioggia di almeno 1 mm. Il numero di giorni piovosi a livello annuale varia dai 90 della fascia costiera ai 120 della zona pedemontana e montana (fig 1.1.3). Mediamente un anno su dieci tali valori salgono a 100-110 giorni sulla costa e 140 sui monti, mentre nell'anno meno piovoso del decennio si passa dalle 70-

[2] per circolazione sinottica si intende la circolazione atmosferica su vasta scala (anche qualche migliaio di Km)
[3] per mesoscala si intende un'estensione geografica dalle decine di km ad alcune centinaia di km

80 giornate piovose della costa alle 100-110 dei monti. Nei mesi invernali di dicembre, gennaio e febbraio il numero medio di giorni piovosi è praticamente uguale su tutta la regione: 6-7. A marzo, novembre e ottobre tale valore cresce e iniziano a differenziarsi le zone con maggiore frequenza di pioggia. Tale differenziazione è massima a giugno, che è anche il mese con maggiore frequenza di piogge, quando sulla costa si contano 9 giornate piovose mentre sulle zone montane si arriva a contarne 15.

Tendenza delle principali grandezze climatiche

Temperatura

Dall'analisi dei dati climatici rilevati dalla rete regionale ed elaborati da ARPA FVG – OSMER emerge, come tendenza più evidente, l'aumento della temperatura media in FVG.

A livello annuale questo andamento è ben rappresentato in fig. 1.1.4. Per la produzione di tale figura sono state analizzate varie serie di temperatura della regione per il periodo 1961-2016. I valori sono stati opportunamente validati e omogeneizzati per ottenere un'unica serie sintetica che ben rappresenta la pianura regionale. Nella figura è evidente come, rispetto a una temperatura media annua di 12.6°C, che era la norma nel trentennio di riferimento (1961-1990), negli ultimi anni si sono raggiunti valori decisamente superiori, con il picco di 14.6 °C del 2014. Nell'intero periodo 1961-2016 l'aumento medio della temperatura media è stato pari a 0.3 °C ogni 10 anni, con una chiara tendenza all'accelerazione nei decenni più recenti (linea tratteggiata in fig. 1.1.4).

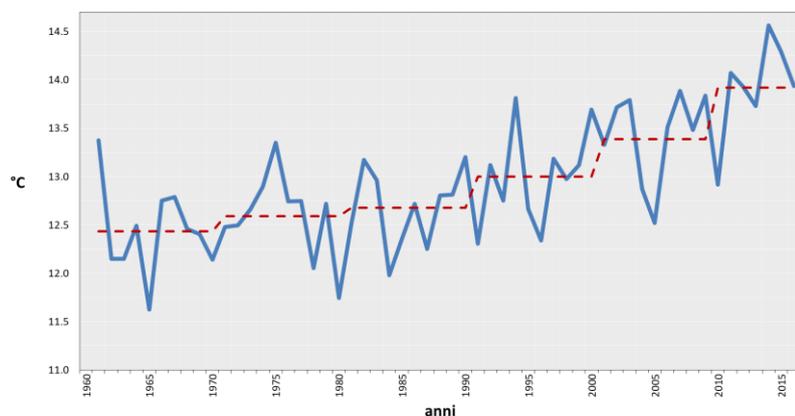



fig. 1.1.4- Andamento delle temperature medie annuali nel periodo 1961-2016 per la pianura del Friuli Venezia Giulia (linea blu continua). La linea tratteggiata rappresenta l'andamento delle temperature medie nei diversi decenni. La serie sintetica che rappresenta la pianura regionale è stata ottenuta analizzando varie serie di temperatura per il periodo 1961-2016, i cui valori sono stati opportunamente validati e omogeneizzati. Elaborazione a cura di ARPA FVG – OSMER

Analizzando i dati suddivisi nelle quattro stagioni (fig. 1.1.5), si nota come gli ultimi due decenni risultino decisamente i più caldi della serie in ogni stagione dell'anno, ma con l'estate che mostra il tasso di incremento maggiore (0.4°C per decennio).

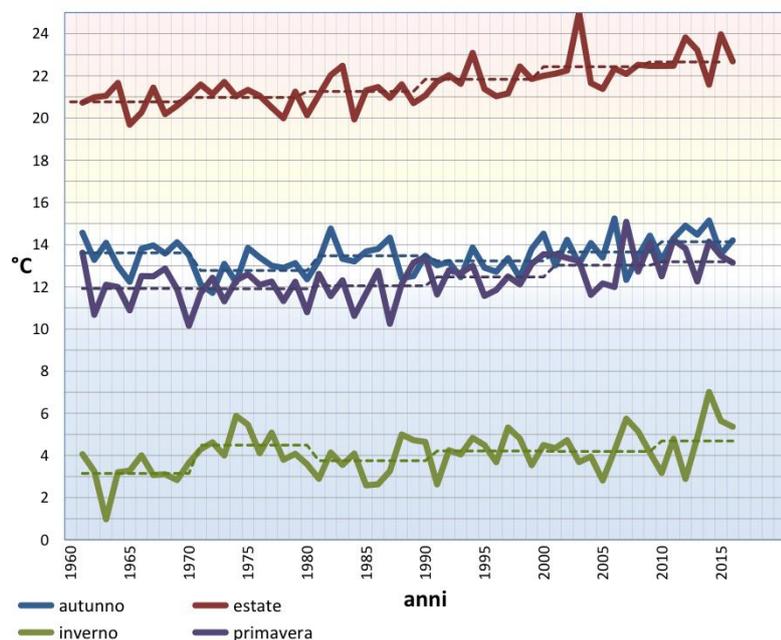



fig. 1.1.5 - Andamento delle temperature medie stagionali nel periodo 1961-2016 per la pianura del Friuli Venezia Giulia (linee continue). Le linee tratteggiate rappresentano l'andamento delle temperature medie nei diversi decenni. Elaborazione a cura di ARPA FVG – OSMER.

Precipitazioni

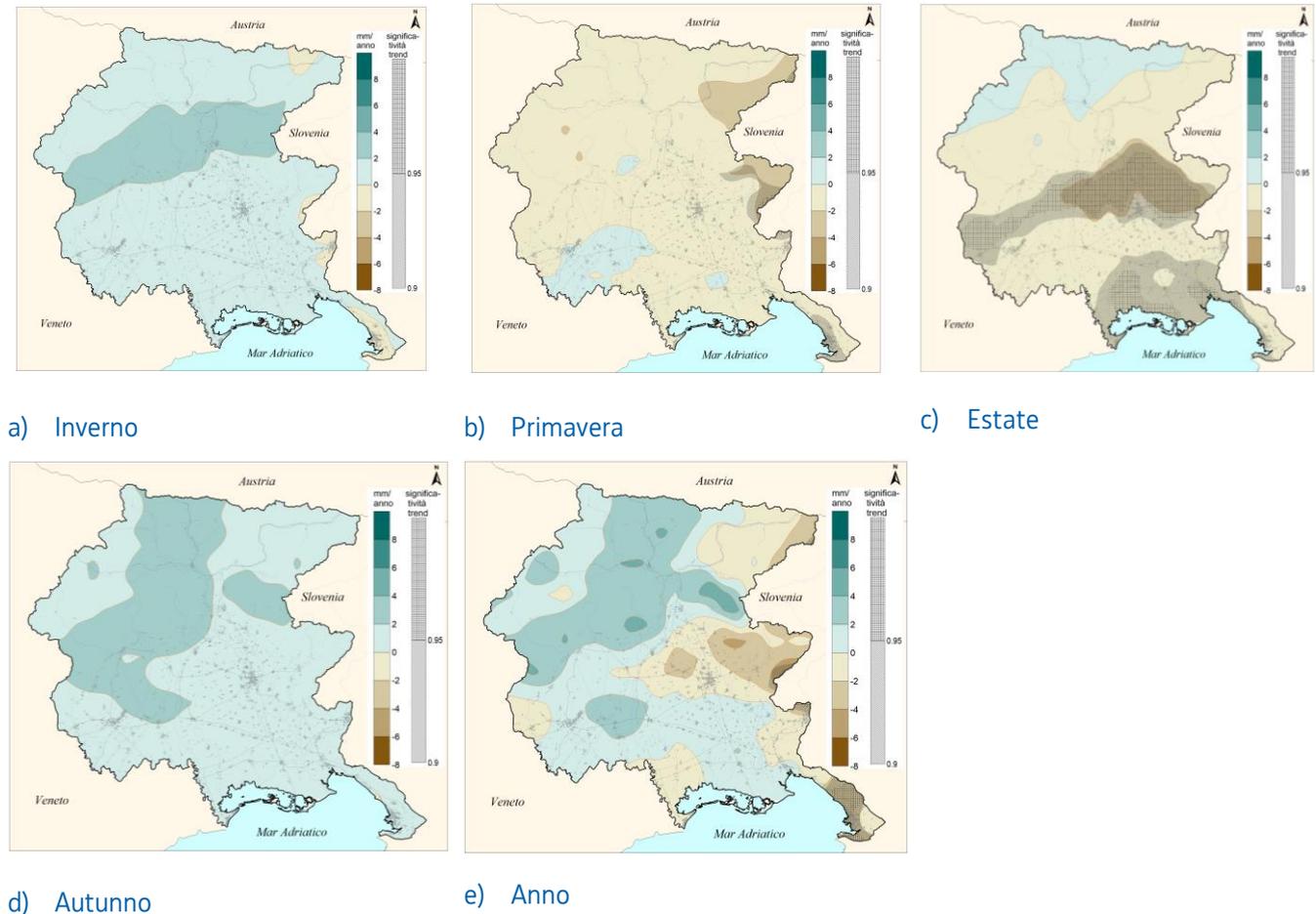
Il segnale del cambiamento climatico sulla pluviometria della nostra regione è meno chiaro, anche per la forte variabilità interannuale di questa grandezza meteorologia. Per l'analisi dei dati di precipitazione si è fatto riferimento ad un lavoro congiunto realizzato dalle Agenzie Regionali e Provinciali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA e APPA) e dai Centri Funzionali di riferimento delle Regioni centro settentrionali italiane all'interno progetto ARCIS (Archivio Climatologico per l'Italia Centro-Settentrionale; www.arcis.it).

In questo lavoro sono stati analizzati i dati di pioggia giornaliera per il periodo 1961-2015 di oltre 1000 stazioni dell'Italia centrosettentrionale e regioni contermini. Per il Friuli Venezia Giuli sono presenti i dati di oltre 90 stazioni.

La fig. 1.1.6 riporta il tasso di variazione nelle precipitazioni annuali e stagionali (trend) osservate nei 55 anni disponibili. Il trend è espresso come mm/anno o mm/stagione.

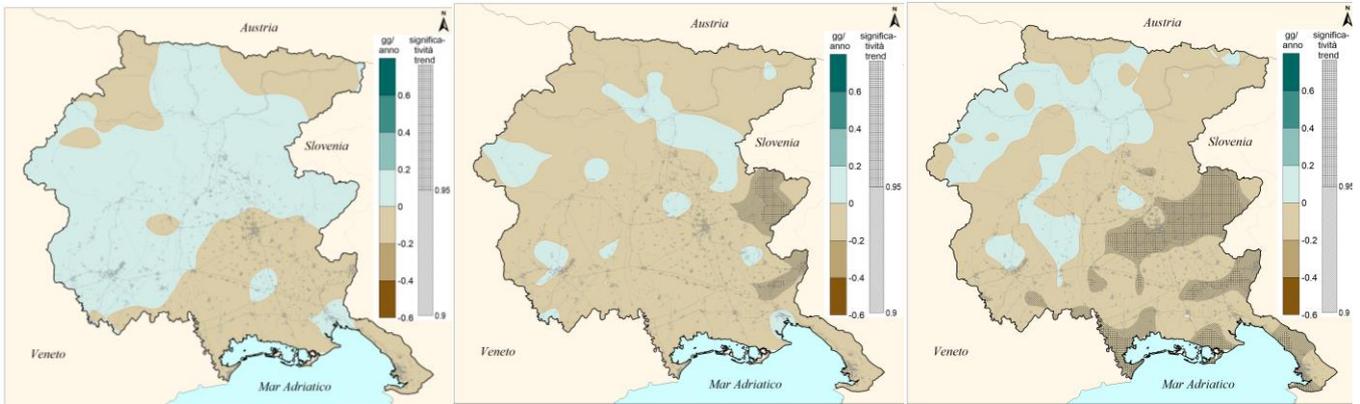
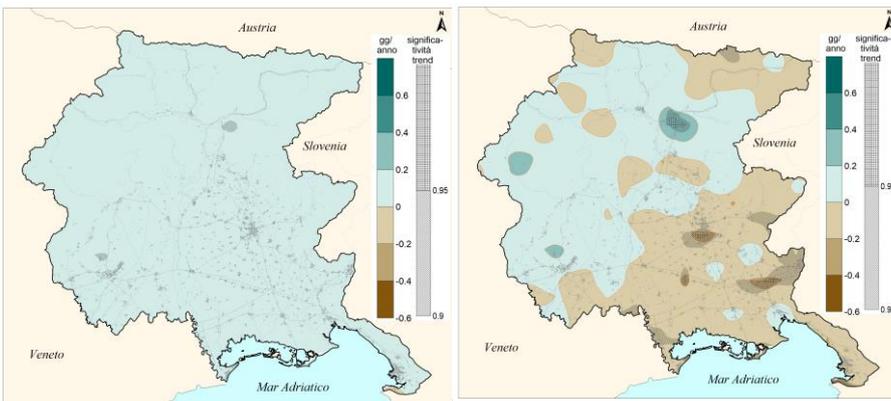
fig. 1.1.6 - Trend delle precipitazioni medie annue e stagionali espresse in mm/anno dal 1961 al 2015. Fonte: ARPA FVG - OSMER e progetto ARCIS.

a) Inverno b) Primavera c) Estate

d) Autunno e) Anno

Si nota come su buona parte della regione vi sia una generale riduzione delle precipitazioni durante la stagione primaverile ed estiva che varia dai -2 ai -4 mm a stagione. D'estate questo trend risulta statisticamente molto significativo specie nella bassa friulana e nell'alta pianura friulana. Durante le stagioni autunnali e invernali si assiste ad un aumento delle piogge anche se i trend non risultano statisticamente significativi.

Il dato annuale risulta territorialmente meno chiaro: da un lato si assiste ad un trend positivo nella parte occidentale della regione (più marcato in zona alpina) dall'altro a una diminuzione media (statisticamente significativa) nelle zone orientali. Per tali aree si può stimare una riduzione delle precipitazioni fino al 15-20 % nel periodo considerato.

Interessante risulta l'analisi del numero di giorni di pioggia, cioè i giorni in cui cade almeno 1 mm di pioggia (fig. 1.1.7).

fig. 1.1.7 - Trend del numero di giorni di pioggia medio annuo e stagionale espresso in gg/anno dal 1961 al 2015. Fonte: ARPA FVG - OSMER e progetto ARCIS.

a) Inverno b) Primavera c) Estate

d) Autunno e) Anno

In buona misura anche questo tasso segue quanto mostrato nelle pluviometrie stagionali: su quasi tutta la regione in primavera e in estate dal 1961 al 2015 il trend è risultato negativo, con una conseguente diminuzione dei giorni piovosi. Durante l'autunno il trend risulta lievemente positivo su tutta la regione mentre d'inverno mostra un comportamento meno caratterizzato a livello territoriale. Comunque è da sottolineare che solamente per la primavera e per l'estate i tassi rilevati risultano statisticamente significativi.

Anche per questa grandezza il dato annuale risulta territorialmente meno chiaro: nella parte occidentale della regione si evidenzia un trend positivo (anche se non statisticamente significativo) mentre nelle zone orientali il trend è negativo e, localmente, statisticamente significativo.

Eventi estremi

In questa sezione analizzeremo i trend osservati di alcuni indicatori termici di eventi estremi in FVG. Il particolare riscaldamento del trimestre estivo in FVG, già osservato al paragrafo precedente, è rilevabile anche dall'aumento delle giornate in cui la temperatura massima supera la soglia dei 30 °C (fig. 1.1.8): risulta evidente come il numero delle giornate molto calde sia passato dai 30 circa degli anni '90 ai quasi 50 nell'ultimo quinquennio.

fig. 1.1.8- Numero di giorni in cui la temperatura massima ha superato la soglia di 30°C nel periodo 1991-2016 per la pianura del FVG. La linea rossa rappresenta l'andamento medio quinquennale.

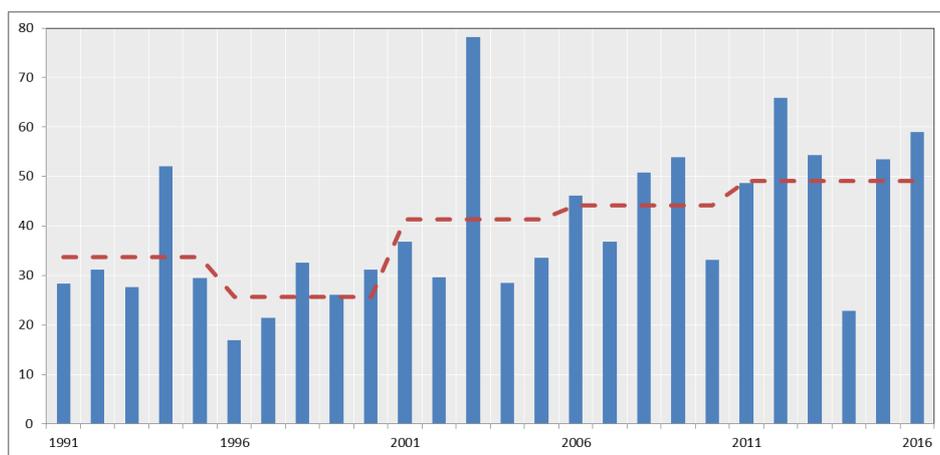
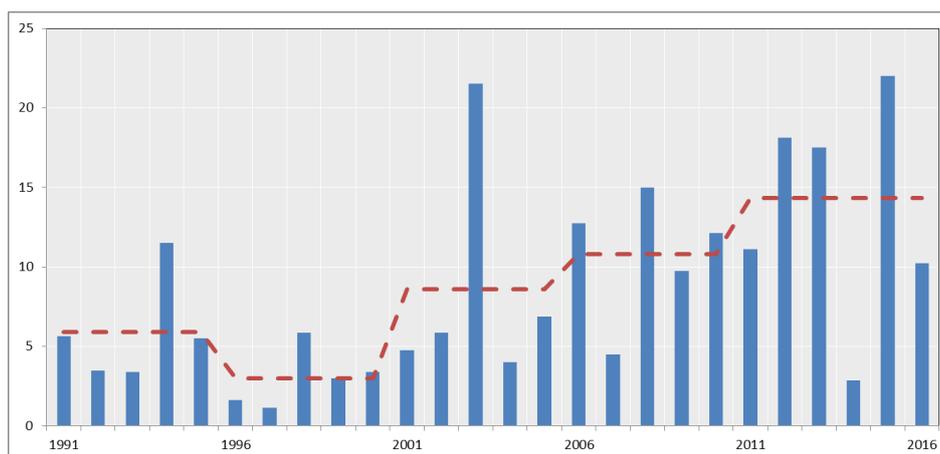
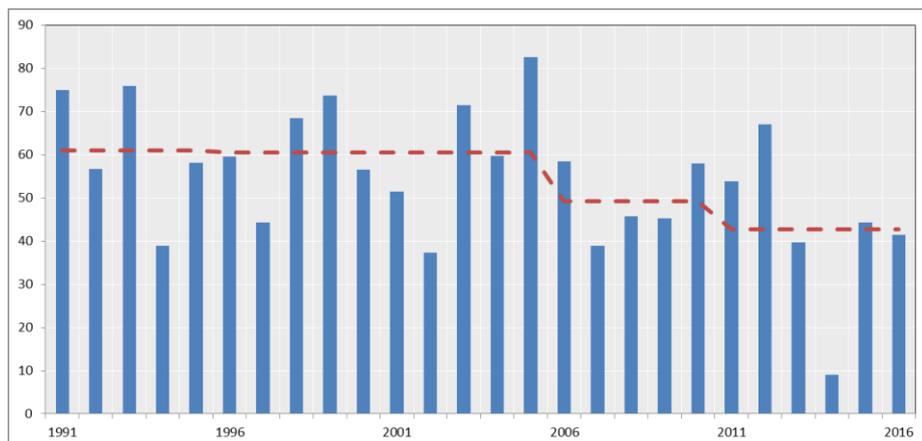



fig. 1.1.9- Numero di notti in cui la temperatura minima si mantiene al di sopra della soglia di 20°C nel periodo 1991-2016 per la pianura del FVG. Fonte: ARPA-OSMER.

Similmente anche il numero delle notti molto calde (notti tropicali), quelle in cui la temperatura minima supera i 20 °C, è aumentato: in fig. 1.1.9 è riportato l'andamento di questo indice calcolato come media di 8 stazioni termometriche della pianura regionale, nel periodo 1991-2016. Anche per questo indice si nota come si sia passati dalle 5 notti circa degli anni '90 alle quasi 15 degli ultimi anni.

Il segnale di inverni più caldi, meno intenso, è comunque facilmente leggibile osservando l'andamento del numero di giorni di gelo, cioè giorni in cui la temperatura minima scende sotto lo zero. Il grafico della fig 1.1.10 mostra come questo indice, calcolato sempre come media delle medesime 8 stazioni di pianura, sia rimasto praticamente costante nei valori medi quinquennali dal 1991 fino al 2005 con valori intorno ai 60 giorni, per scendere a poco più di 40 negli ultimi anni.

fig 1.1.10 - Numero giorni in cui la temperatura minima raggiunge la soglia di 0 °C nel periodo 1991-2016 per la pianura del FVG. Fonte: ARPA-OSMER.

Criosfera

Renato R. Colucci -CNR- ISMAR U.O.S. di Trieste

Il termine criosfera (derivante dalla parola greca *kryo* = freddo) si riferisce a tutte quelle porzioni della superficie terrestre che si presentano allo stato congelato, ovvero con una temperatura inferiore a 0 °C. Calotte glaciali, ghiaccio marino, *icebergs*, ghiaccio lacustre, copertura nevosa, ghiaccio nel suolo, ghiacciai e *ice sheets* ne fanno parte integrante. La criosfera comprende però anche tutte quelle porzioni di territorio che, pur non presentando acqua allo stato solido, mantengono sempre, ovvero per almeno due anni consecutivi, temperature inferiori a 0 °C (ambienti di permafrost).

Gli studi sulla criosfera del FVG si sono riferiti in passato al tentativo di ricostruire le principali fasi glaciali pleistoceniche. Proprio con l'intento di verificare se vi fossero ancora dei resti relitti di queste glaciazioni, geografi di fine '800 si recarono in esplorazione lungo la Val Raccolana alla ricerca dei resti di questi antichi ghiacciai. Questi ipotetici resti vennero riconosciuti nei ghiacciai del Canin, allora ancora molto estesi rispetto alle dimensioni attuali.

Da allora misure di avanzata o arretramento della fronte furono raccolte a partire dalla fine del XIX secolo, via via abbandonate o ridimensionate nel corso del XX secolo. Il fatto che la criosfera presente non fosse stata particolarmente investigata è probabilmente dovuto alla sua apparente scarsità se messa a confronto con altri settori delle Alpi.

Negli ultimissimi anni, notevoli sforzi sono stati messi in campo nella ricostruzione delle dimensioni dei ghiacciai in epoca storica sul territorio del FVG, in particolare in riferimento alla ricostruzione di areali e volumi delle masse ghiacciate presenti in FVG nella fase climatica denominata piccola età glaciale (PEG). La PEG è ben riconosciuta in tutto il sistema alpino grazie ai depositi morenici recenti e, spesso, a litografie e fotografie risalenti al 1700 e 1800. Il suo inizio lo si pone generalmente tra l'inizio e la metà del 1300 ed il suo termine al 1865, quando tutti i ghiacciai principali delle Alpi iniziarono una evidente fase di contrazione. Questo periodo è caratterizzato da una fase di diminuzione della temperatura a livello alpino di circa 1.5-2.0 °C, associata verosimilmente ad un incremento medio delle precipitazioni invernali.

Sul territorio del FVG la criosfera è presente sotto forma di: 1) ghiacciai e relitti glaciali o glacio-nivali; 2) ghiaccio permanente di cavità (*ice caves*); 3) *permafrost.*

Ghiacciai e relitti glaciali o glacio-nivali

Nonostante nessuna cima raggiunga i 3000 m di quota e le zone morfologicamente adatte per l'accumulo e la conservazione di masse ghiacciate siano generalmente collocate a quote tra i 1700 ed i 2400 m, quindi molto al di sotto sia della quota media dello zero termico sia della linea di equilibrio (ELA) dei ghiacciai, le Alpi Giulie conservano ancora 23 piccoli corpi glacio-nivali permanenti, di cui 14 nella parte italiana e 9 in quella slovena (Colucci, 2016). Questi resti glaciali derivano da 19 ghiacciai di piccole e medie dimensioni che esistevano durante la PEG, con dimensioni e volumi nettamente superiori a quelli attuali (Colucci e Žebre, 2016). L'esistenza di relitti glaciali ancora attivi a quote così basse come il Montasio Occidentale (piccolo ghiacciaio montano), il Canin Orientale ed Occidentale (glacionevati ed *ice patches*), il Prevala (glacionevato), assieme ad altri minori come il Montasio Orientale, il Minore di Montasio, il Cergnala, lo Studence e il Carnizza-Rio Freddo (glacionevati), il Prestrelienik (*ice patch* ricoperto da detrito), il Vasto, l'Ursich ed il Torre Gilberti (*ice patches*), è favorita da fattori climatici regionali e dalla geomorfologia degli ambienti delle Alpi Giulie. Il clima delle Alpi e Prealpi Giulie è infatti caratterizzato da regimi pluviometrici particolari, indotti principalmente dall'orografia e dalla vicinanza al mare Adriatico, che portano a superare frequentemente i 3000 mm di accumulo totale annuo. Il fenomeno è indotto in particolare dal *low level jet* (flusso d'aria nella bassa troposfera ad elevata velocità) che si innesca in condizioni di correnti umide meridionali. Queste, spinte da venti meridionali sinottici, portano precipitazioni di natura orografica su quest'area (fenomeni di *stau*). L'assetto geomorfologico delle montagne calcaree delle Alpi Giulie è poi in grado di moltiplicare localmente di svariate volte l'apporto nevoso di precipitazione grazie ai fenomeni valanghivi che contribuiscono ad incrementare l'apporto di neve sugli apparati glacio-nivali, portando a bilanci invernali di accumulo particolarmente ingenti (Colucci, 2016).

In Alpi Giulie la riduzione glaciale nel corso dell'ultimo secolo, ed in particolare negli ultimi 30 anni, è stata straordinariamente rapida, nonostante alcuni apparati abbiano evidenziato in particolare nell'ultimo decennio, una maggiore resilienza al cambiamento climatico in atto. La superficie complessiva interessata dai ghiacciai al picco della PEG era di 1.55 km^2, mentre attualmente (2012) le masse ghiacciate permanenti ricoprono solamente 0.28 km^2 del territorio delle Alpi Giulie, che equivale ad una riduzione dell'82%. Il volume complessivo è passato da 45.40 km^3 10^{-3} a 1.82 km^3 10^{-3} con una perdita totale del 96% (Colucci e Žebre, 2016). Il tutto è messo in evidenza in fig. 1.1.11 dove sono presentati gli spessori del ghiaccio ricostruiti al picco della PEG e confrontati gli areali di allora con gli areali misurati alla fine del periodo di ablazione 2012.

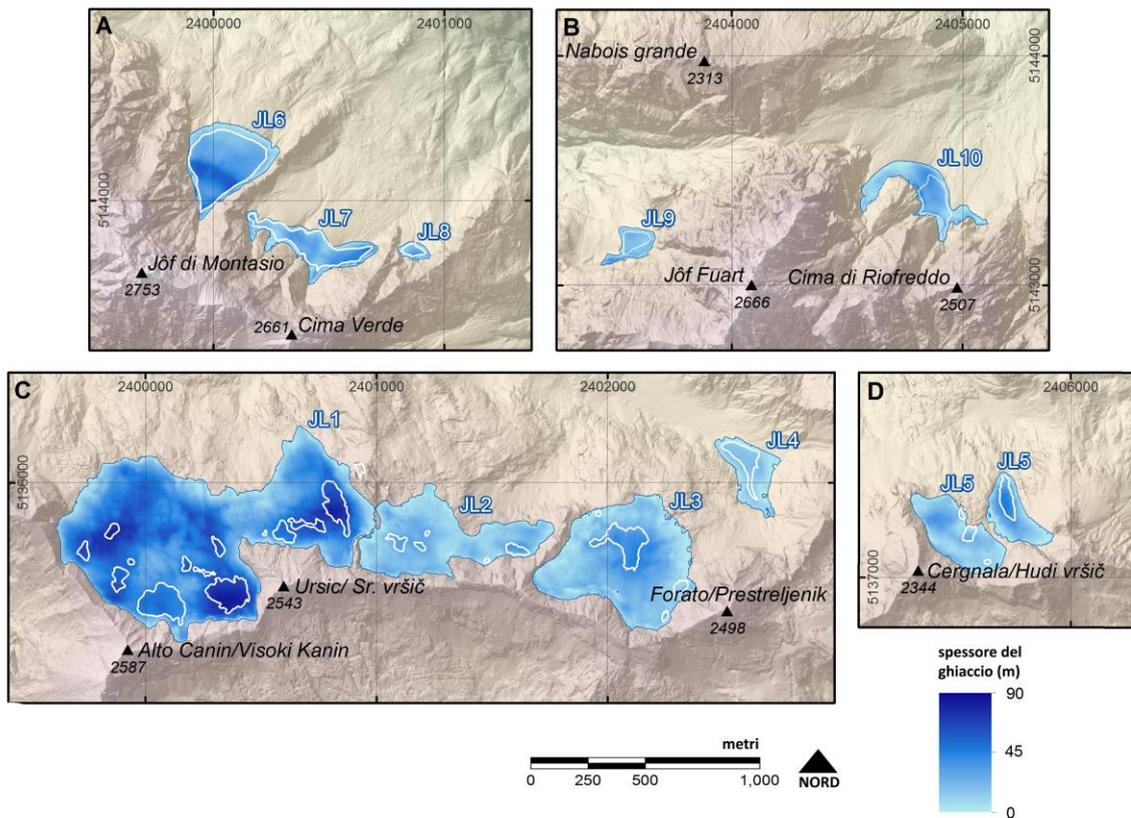
fig. 1.1.11 Area e spessore del ghiaccio ricostruito al picco della PEG degli apparati glaciali del FVG. Con i poligoni bianchi sono messe in evidenza le dimensioni degli stessi alla fine del periodo di ablazione 2012 (modificato da: Colucci e Žebre, 2016).

Tale drastica riduzione è strettamente correlata alla variazione delle condizioni climatiche, ed in particolare all'andamento delle temperature medie annuali ed estive ed alle precipitazioni medie annue o invernali. Questi due parametri, combinati assieme, permettono di quantificare la ELA che di fatto divide la zona di accumulo di una ghiacciaio, dove i bilanci di massa annuali sono sempre positivi, dall'area di ablazione, dove invece i bilanci di massa annuali sono negativi. Dal 1851 ad oggi la temperatura media nelle Alpi Giulie ad una quota di 2200m è aumentata di 1.7°C (fig. 1.1.12; Colucci e Guglielmin, 2015). Questo dato rappresenta un valore quasi doppio di quello osservato a scala globale. Contestualmente si sono osservate delle variazioni nella distribuzione delle precipitazioni invernali ed in particolare nella lunghezza delle stagioni di accumulo (inverno) e di ablazione (estate). La ELA (fig. 1.1.13), stabile attorno ai 2300 m di quota nel periodo di osservazione disponibile tra gli anni 1920 e 1940, ha subìto una prima risalita fino a quasi 2600 m tra gli anni 1940 e 1950, per poi tornare a poco più di 2300 m tra gli anni 1960 e 1980. Dalla prima metà degli anni 1980 in poi la risalita è stata pressoché costante fino alla metà degli anni 2000, quando ha sfiorato i 2750 m di quota (Colucci, 2016). La correlazione con le misure di arretramento della fronte del ghiacciaio orientale del Canin, di cui si dispone di una serie lunga oltre un secolo, è molto alta e mette in evidenza l'importanza di questo parametro climatologico per descrivere le fasi più o meno favorevoli al glacialismo di un'area (fig. 1.1.13).

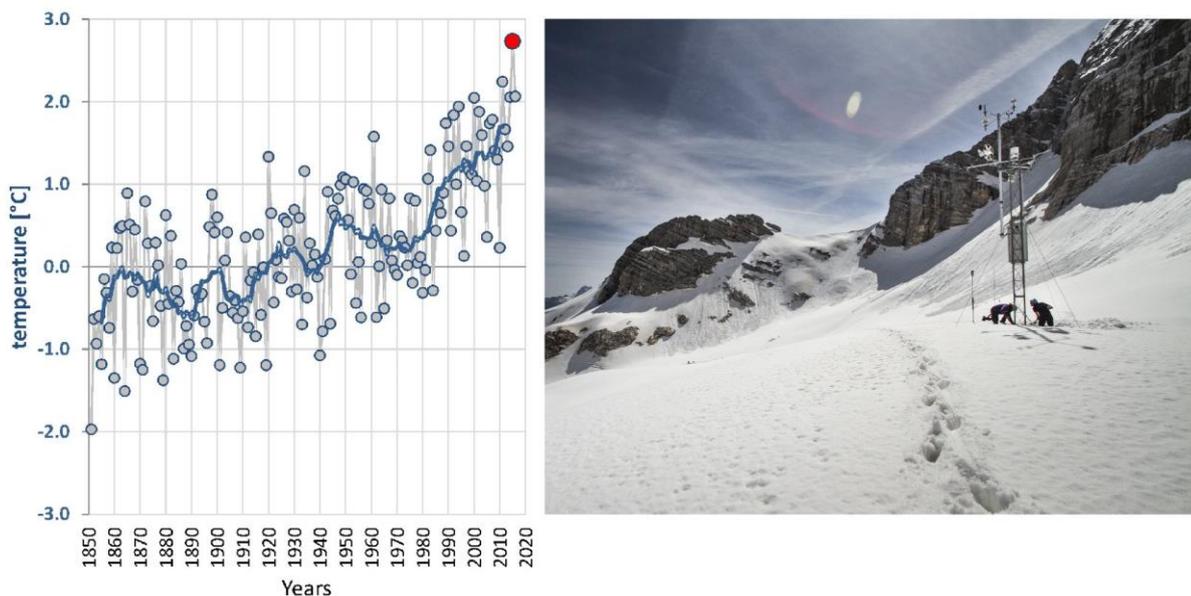
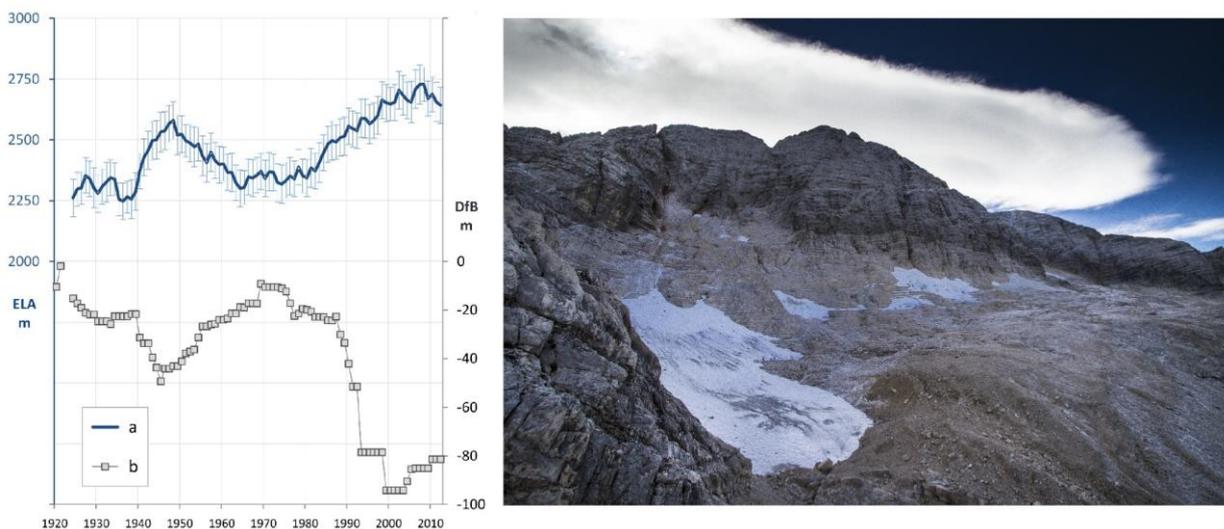
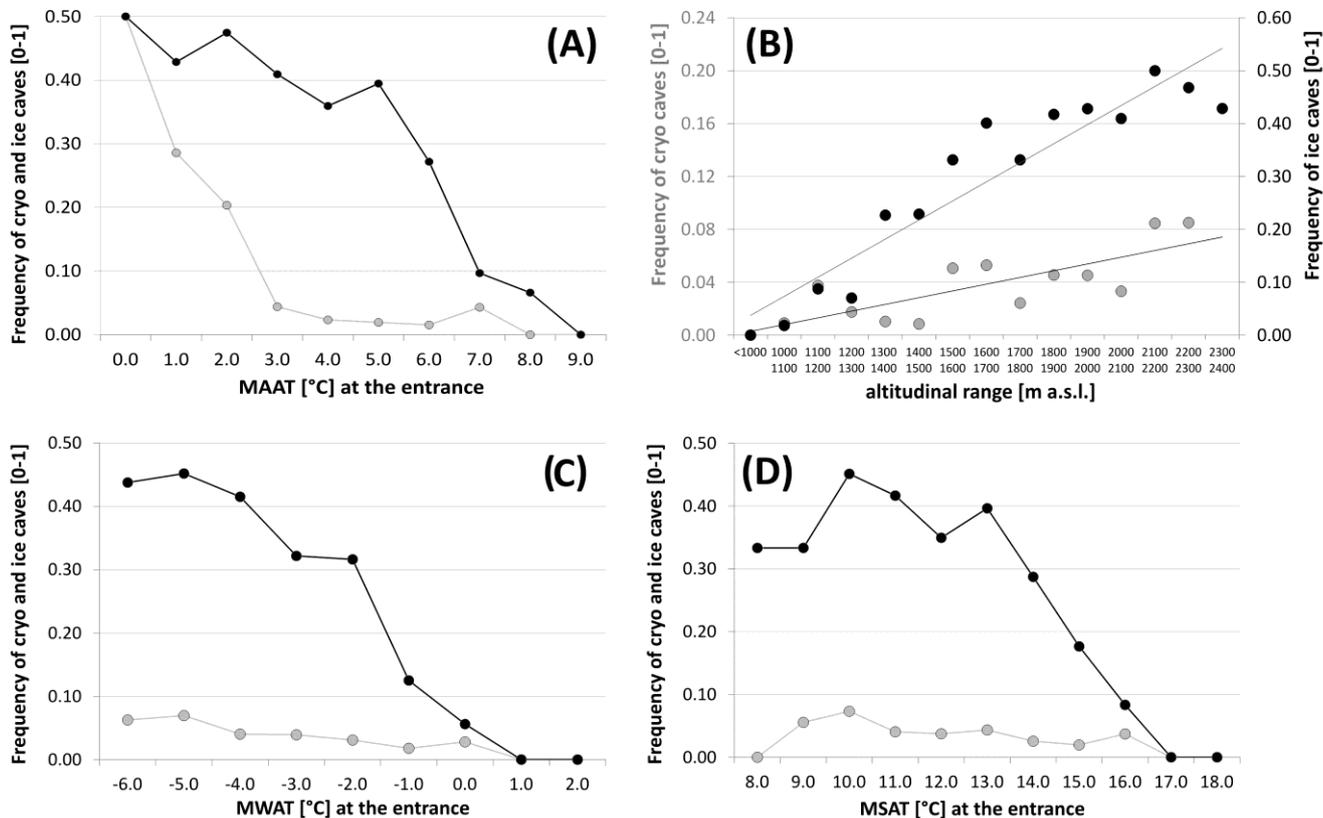
fig. 1.1.12 – Temperatura media annua registrata alla stazione meteorologica automatica del Canin, 2200 m s.l.m.m. (Dati UMFVG e Parco Naturale Prealpi Giulie). Per i dettagli sulla ricostruzione della serie di temperatura vedi Colucci e Guglielmin, 2015. In rosso è messo in evidenza l'anno 2015, il più caldo della serie. A destra un'immagine della stazione meteorologica a primavera 2016 (Foto Renato R. Colucci).

La riduzione della criosfera regionale ha subito una forte accelerazione a partire dalla metà degli anni '80 e fino alla metà degli anni 2000 (fig. 1.1.13). Copiose nevicate in alcuni inverni degli ultimi 10 anni hanno invece portato una fase di relativa stabilità e l'ingente copertura nevosa osservata a fine primavera negli anni 2009, 2010, 2013 e 2014 ha permesso di bilanciare estati sempre più lunghe e sempre più calde permettendo di misurare bilanci di massa annuali anche positivi, contrariamente a quanto avviene sul resto delle Alpi. Questo segnale climatico è riscontrabile anche dall'andamento della ELA che ha subito un abbassamento di quota quantificabile in circa 60 m (fig. 1.1.13).

fig. 1.1.13 – Variazioni della ELA (a) e della distanza della fronte del ghiacciaio Orientale del Canin dai punti di controllo (b) dal 1920 ad oggi. È evidente la stretta correlazione tra le due variabili, a contrazioni e fasi recessive del ghiacciaio è associato un aumento di altitudine della ELA. A destra una immagine del ghiacciaio Orientale del Canin (ormai declassato a glacionevato) alla fine del periodo di ablazione 2015. (modificato da Colucci, 2016; Foto Renato R. Colucci).

Nell'attuale fase climatica presente la permanenza di questi relitti glaciali è però ulteriormente minata dagli eventi estremi indotti dal riscaldamento globale in atto, che ridisegna la disposizione dei pattern meteorologici a scala regionale e globale. L'insorgenza di eventi estremi sempre più frequenti, in particolare ondate di calore estive e fasi di siccità invernale, rappresenta un ulteriore fattore di accelerazione della deglaciazione in atto, ora dovuta non solamente alle variazioni di temperatura osservate durante la stagione estiva, ma anche a possibili ondate di calore ad alta quota durante il periodo invernale come recentemente osservato ad esempio nel dicembre 2015 (Colucci et al., 2017).

Ghiaccio sotterraneo permanente

Le grotte di ghiaccio (*ice caves*) sono definite cavità naturali nella roccia (calcari, dolomie, tubi di lava) che contengono accumuli perenni di ghiaccio (Perşoiu e Onac, 2012). Poiché il ghiaccio delle caverne è in genere più vecchio di due anni, le grotte di ghiaccio sono comunemente considerate come un fenomeno di permafrost sporadico (ad es. Holmlund e alii, 2005). La presenza di depositi di ghiaccio nelle caverne è strettamente legata a climi freddi, anche se è possibile trovarle ad altitudini o latitudini dove la temperatura media annuale è di diversi gradi al di sopra del punto di congelamento (ad es. Luetscher et al., 2005; Colucci et al., 2016). Le grotte di ghiaccio sono tipicamente classificate in base alle loro caratteristiche termodinamiche (Luetscher e Jeannin, 2004). In particolare, la presenza di una o più entrate in grotta consente di distinguere tra grotte di ghiaccio dinamiche, soggette a convezione forzata (ad esempio effetto camino) e grotte di ghiaccio statiche esposte ai flussi d'aria azionati da differenze di densità durante la stagione invernale (Thury, 1861, Balch, 1900).

Sul territorio del Friuli Venezia Giulia sono state recentemente individuate e catalogate più di un migliaio di cavità criotiche appartenenti ad entrambe le tipologie appena descritte (Colucci et al., 2016), ed alcune di queste, selezionate per tipologia e caratteristiche, sono in fase di studio da diversi anni. Si è inoltre provveduto a distinguere le cavità criotiche da quelle ghiacciate, distinguendo le seconde dalle prime per la sola presenza di ghiaccio e non di altri materiali congelati (neve, *firn*). Le grotte criotiche si trovano a partire dai 1000 m di quota in su (non sono stati rinvenuti depositi di ghiaccio in cavità con ingressi a quote inferiori) e la loro percentuale, rispetto alle grotte non contenenti alcun deposito di ghiaccio o neve, si incrementa in maniera piuttosto costante con l'abbassamento della temperatura media degli ingressi e, quindi, con la quota. Sono state individuate alcune soglie di temperatura che sembrano essere determinanti nella preservazione di depositi criotici sotterranei (fig.1.1.14). Le grotte con ghiaccio e neve sono prevalentemente concentrate laddove la temperatura media annua nei pressi dell'ingresso principale è inferiore a 5°C, che scende a 2°C per le cavità che contengono solamente ghiaccio. Nonostante la temperatura media estiva non sembri essere determinante, la percentuale di grotte criotiche inizia a diminuire drasticamente per valori superiori a 13°C, per andare a zero con valori di temperatura media estiva superiori a 17°C. Le grotte criotiche non sono presenti dove la temperatura invernale è superiore alla soglia 0°C, ed aumenta significativamente per temperature invernali inferiori a -2°C. La quota altitudinale che vede la maggior frequenza di cavità criotiche o ghiacciate è compresa tra 1500 e 2200 m, con una quota mediana di 1888 m ed una media di 1838 m. La maggior frequenza di cavità criotiche e ghiacciate è riscontrabile nel massiccio del Monte Canin (Prealpi Giulie).

fig. 1.1.14 - A) temperatura media annua all'ingresso delle cavità criotiche (line e pallini neri) e ghiacciate (linee e pallini grigi); B) frequenza in funzione dell'altitudine; C) frequenza in funzione della temperatura media invernale (MWAT); D) frequenza in funzione della temperatura media estiva (MSAT) (Da Colucci et al., 2016).

La distribuzione delle cavità di ghiaccio del FVG in passato rimane oscura, anche considerando il fatto che le esplorazioni speleologiche in montagna si sono sostanzialmente sviluppate solo a partire dagli anni 1960-1970. Anche l'osservazione di eventuali trend recenti di fusione del ghiaccio sotterraneo rimane di difficile quantificazione in quanto a parte poche testimonianza sporadiche sul territorio (Es. Muscio e Mocchiutti, 2009) non vi sono mai stati monitoraggi sistematici atti a valutare il bilancio di massa del ghiaccio sotterraneo. Studi molto recenti effettuati in regione (Colucci et al., 2016) hanno dimostrato come a partire dal 2013-2014, a seguito di una fase di relativa stabilità osservata negli anni precedenti, sia in atto una fase di deglaciazione molto marcata in alcune delle cavità monitorate al di sopra dei 2000 m. Una causa di questa repentina fase di riduzione della criosfera sotterranea è stata individuata nell'insorgenza di eventi di pioggia estrema a quote elevate, in grado di convogliare ingenti quantità di acqua con temperatura di alcuni gradi positivi sia direttamente sui depositi di ghiaccio sotterraneo, sia attraverso le fratture della roccia. Questo ha verosimilmente portato ad un aumento delle temperature dell'aria nel sottosuolo così come della roccia. Inverni particolarmente miti in quota hanno ulteriormente inciso su questo processo impedendo il consueto raffreddamento invernale dell'ambiente di grotta. Fasi di monitoraggio sistematico di questi parametri sono attualmente in atto a partire dal 2011. Testimonianza fotografiche relative alle prime esplorazioni speleologiche in alcune cavità di alta quota mostrano come a quote inferiori questo processo sia iniziato verosimilmente ben prima, probabilmente dalla fine degli anni 1980. La correlazione tra fusione del ghiaccio sotterraneo e condizioni climatiche atmosferiche esterne non è stata ancora interamente chiarita, in particolare perché mancano al momento modelli micro-meteorologici e micro-climatici che possano simulare correttamente ed esaustivamente i processi in atto in questi ambienti.

Permafrost

Le aree interessate da possibile permafrost nel territorio del Friuli Venezia Giulia sono esigue e limitate. Le temperature medie dell'aria nel periodo 1981-2010, spazializzate sull'intero territorio del Friuli Venezia Giulia, mostrano estremi minimi di -2.6 °C sulle vette più alte della regione che non superano mai i 2800 m. Assumendo un gradiente termico medio di 6.5 °C km^{-1}, l'altitudine dell'isoterma 0 °C è stimabile in 2370±90m. L'isoterma -2 °C che generalmente individua da un punto di vista climatologico gli ambienti dove l'azione del gelo è predominante (French, 2007) è stimata a 2665±90 m, conseguentemente in porzioni di territorio inferiori all'1% (Colucci et al., 2016). Ciò nonostante, per cause microclimatiche, geomorfologiche e geologiche, sono state individuate recentemente delle aree ove la presenza di permafrost è presente in maniera sporadica in falde di detrito, argini nivomorenici (*protalus rampart*) e *rock glaciers* inattivi. Tali evidenze sono state individuante con metodi indiretti quali il BTS (*Bottom Temperature of Snow-cover*) e con metodi geofisici. C'è inoltre da rilevare come alcuni degli apparati glaciali attualmente esistenti stiano ricevendo un ingente apporto di detrito a causa dei processi paraglaciali in atto. Queste aree, in futuro, potrebbero evolvere in aree di permafrost portando ad una evoluzione degli ambienti glaciali in periglaciali già osservata in altri settori alpini.

Mare

Fabio Raicich[1], Cosimo Solidoro[2], Stefano Salon[2]
[1]CNR- ISMAR U.O.S. di Trieste
[2]OGS

Le aree marine di interesse per il Friuli Venezia Giulia comprendono la laguna di Marano-Grado e il mare aperto prospiciente la costa dal confine con il Veneto a quello con la Slovenia. Si tratta della parte più settentrionale dell'Adriatico, e quindi dell'intero Mediterraneo. La posizione semicontinentale rende l'area soggetta all'elevata variabilità del forzante atmosferico, che caratterizza la regione, e dell'apporto delle acque continentali. Questo, associato alla modesta profondità (al massimo 25 m nel Golfo di Trieste) causa notevoli variazioni del bilancio termico e idrologico, e quindi delle caratteristiche della massa d'acqua. Quest'ultima inoltre risente della circolazione dell'intero Adriatico, a sua volta dipendente da quella dell'intero Mediterraneo.

La circolazione dell'Adriatico è sostanzialmente ciclonica, con correnti che risalgono in direzione nord-ovest lungo la costa croata e scendono in direzione sud-est lungo la costa Italiana (fig. 1.1.15). A questa struttura generale si sommano gli effetti batimetrici che inducono strutture cicloniche a scala di sottobacino nella fossa meridionale e in quelle centrali. La variabilità meteorologica e idrologica generano inoltre correnti superficiali (fig. 1.1.16) e profonde (fig. 1.1.17) a diverse scale spaziali e temporali.

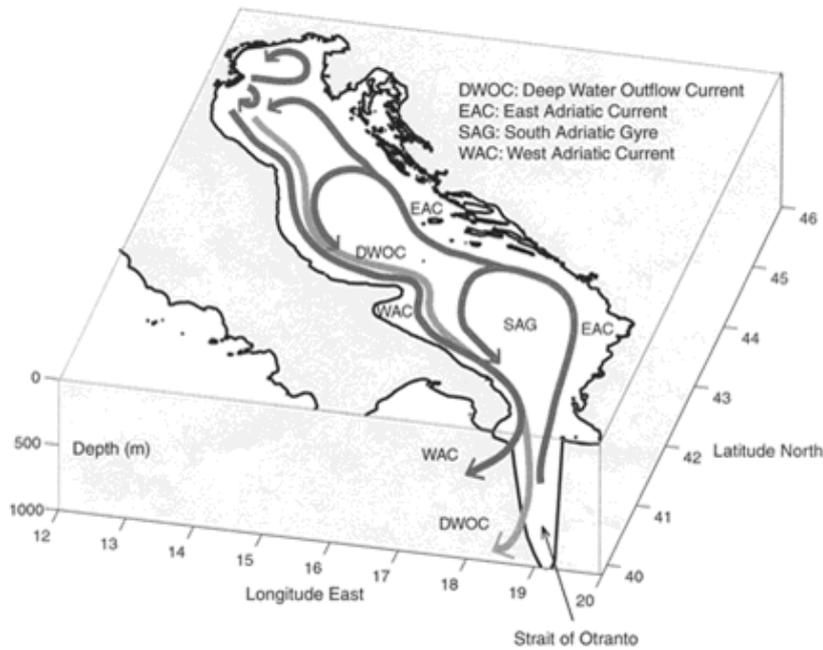



fig. 1.1.15– Circolazione generale nel Mare Adriatico.

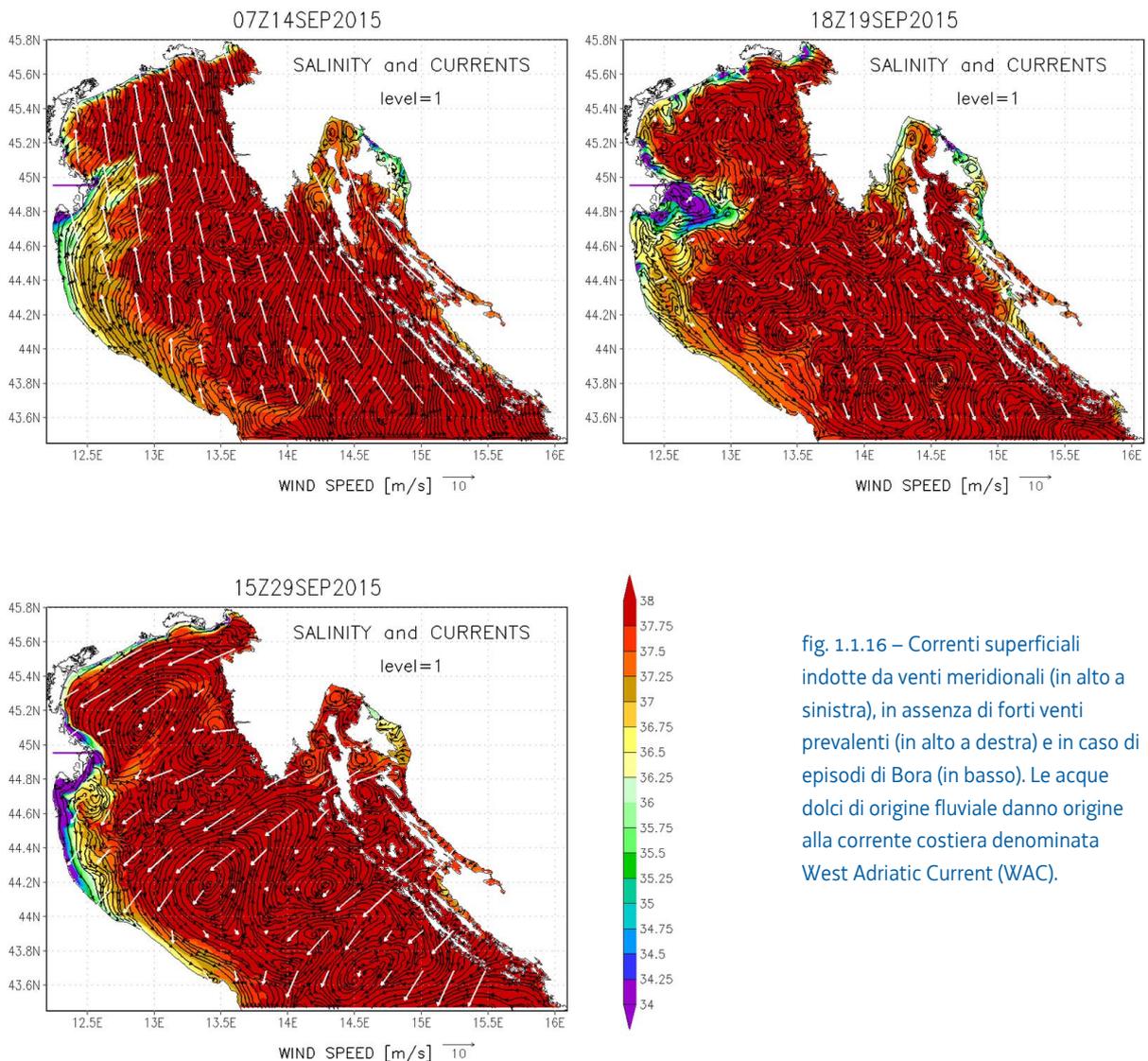



fig. 1.1.16 – Correnti superficiali indotte da venti meridionali (in alto a sinistra), in assenza di forti venti prevalenti (in alto a destra) e in caso di episodi di Bora (in basso). Le acque dolci di origine fluviale danno origine alla corrente costiera denominata West Adriatic Current (WAC).

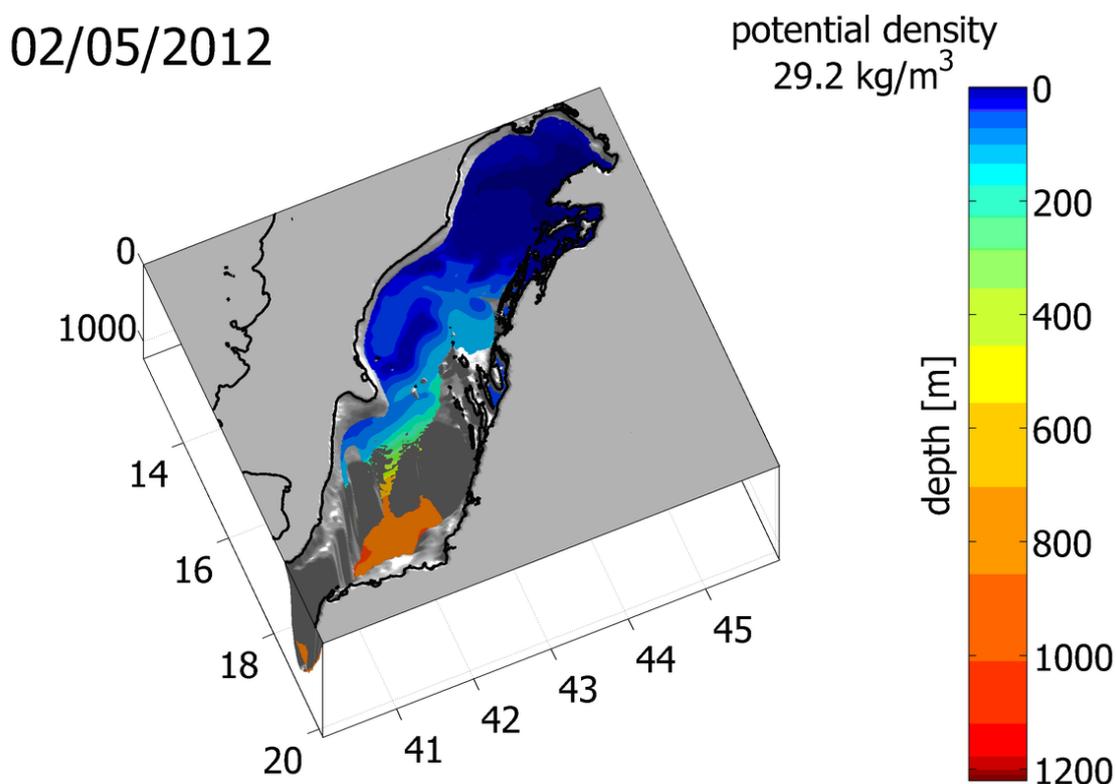
fig. 1.1.17 – Circolazione profonda: flusso di acqua densa prodotta nei mesi invernali che, nel periodo primaverile/estivo, si dirige verso il canale d'Otranto (DWOC). Le masse d'acqua più dense scendono fino a ventilare gli strati profondi della fossa sud adriatica.

Al contrario di altre aree del Mare Adriatico, il Golfo di Trieste sembra non presentare una circolazione generale ben determinata. Il carattere torrentizio delle portate dell'Isonzo, i frequenti ed impulsivi eventi di Bora, l'effetto dei venti meridionali (principalmente lo Scirocco) non consentono di determinare un verso prevalente di circolazione (ciclonico o anticiclonico) per l'intero bacino. Inoltre, il disaccoppiamento che spesso si riscontra fra gli strati superficiali e quelli di fondo indica che in tali condizioni l'asse della circolazione è orizzontale piuttosto che verticale (fig. 1.1.18 e 1.1.19). In sostanza, spesso si osserva un meccanismo di ricambio delle acque che non prevede una circolazione di masse d'acqua omogenea lunga tutta la colonna ma entranti/uscenti in superficie e quindi uscenti/entranti al fondo (Querin et al., 2007; Solidoro et al., 2010). Il fiume Isonzo, che fornisce il maggior apporto di acque dolci al bacino, influenza principalmente lo strato superficiale delle zone più settentrionali del Golfo, ma, in occasione di piene rilevanti ed assenza di vento, il *plume* di acqua fluviale può superare Miramare e raggiungere anche Muggia (fig 1.1.19). In altri casi, e tipicamente con venti da sud e soprattutto da est, il *plume* viene velocemente sospinto verso il litorale gradese e successivamente fuori dal Golfo e non influenza le acque del bacino. L'elevata variabilità spaziale dovuta alle strutture di mesoscala (vortici e meandri) e la loro spiccata stagionalità conferiscono un ulteriore livello di complessità alla circolazione del bacino. Queste strutture sono particolarmente evidenti in presenza di venti deboli.

fig. 1.1.18 – Circolazione media nel mese di gennaio 2007. La circolazione superficiale è ciclonica mentre le correnti di fondo sono generalmente entranti nel bacino.

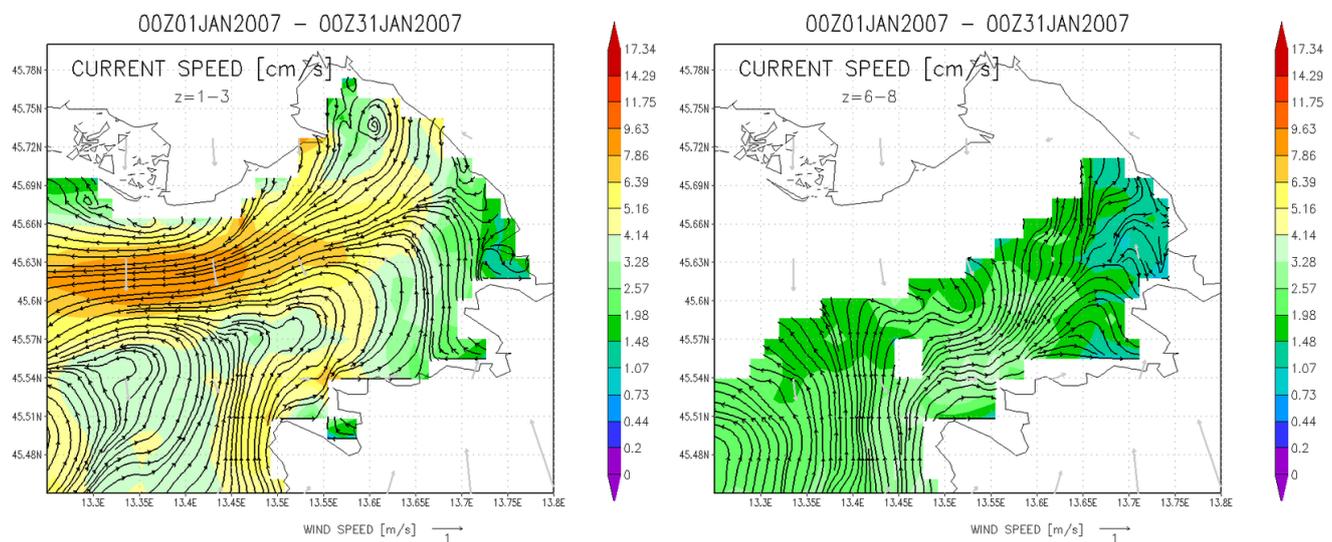
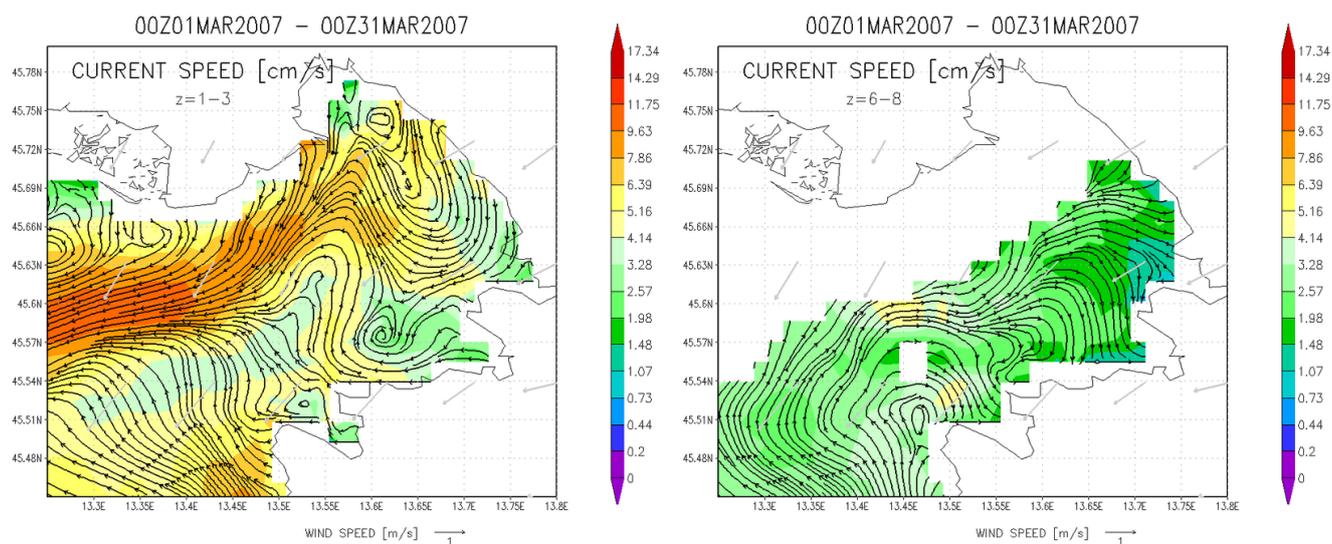



fig. 1.1.19 – Circolazione media nel mese di marzo 2007. Gli apporti di acqua dolce dell'Isonzo creano una corrente anticiclonica di tipo estuarino che interessa la parte nord-orientale del bacino. Le correnti al fondo, entranti, bilanciano la corrente uscente in superficie.

Temperatura e salinità

Le proprietà fisiche del nord Adriatico sono oggetto di misure almeno da metà '800. Mentre al largo le osservazioni sono state effettuate durante campagne svolte irregolarmente nel tempo (a parte le interruzioni nei periodi bellici), fin dalla fine del XIX secolo la temperatura è stata misurata quotidianamente per lunghi periodi (anche se con interruzioni) in siti costieri, di solito portuali, come a Pola (1882-1918), Trieste (dal 1899 a oggi) e Rovigno (dal 1920 a oggi). Solo nel secondo dopoguerra sono iniziate campagne sistematiche di misura lontano dalla costa, come quelle svolte mensilmente o stagionalmente in stazioni fisse lungo il transetto Rovigno-foce del Po (Supić et al., 2004). Risale a meno di 30 anni fa il ricorso a stazioni automatiche costiere o collocate su boe, per la misura della temperatura e della salinità (Ravaioli et al., 2016).

Essendo l'area costiera del bacino poco profonda, essa è fortemente influenzata dalla variabilità atmosferica e dell'apporto di acque continentali, pertanto le variazioni stagionali e interannuali di temperatura e salinità sono molto marcate. Si possono inoltre osservare marcati gradienti spaziali, in ragione dell'apporto delle acque continentali, solitamente confinato lungo la fascia costiera e/o gli strati più superficiali della colonna d'acqua.

L'analisi dei dati di salinità permette di evidenziare le zone di influenza fluviale, ma permette anche di tracciare l'ingresso delle acque più salate meridionali che risalgono lungo la costa orientale. L'analisi dei dati di temperatura (Solidoro et al., 2009; Cossarini et al., 2012) evidenzia che nel nord Adriatico la variabilità stagionale prevale su quella spaziale, con valori minimi in gennaio (zone costiere) o febbraio (zone a largo) e valori massimi in agosto (acque superficiali) o settembre (acque di fondo). L'analisi dei profili verticali evidenzia il ben noto fenomeno di mescolamento invernale, con valori omogenei lungo tutta la colonna d'acqua e la stratificazione estiva.

Secondo Supić et al. (2004) nel 1921-2000 non si osservano significative tendenze né nella temperatura né nella salinità, tuttavia un aumento di temperatura è osservato almeno dal 1970, coerentemente con l'analogo aumento della temperatura atmosferica. Si deve notare che l'andamento su lungo periodo della temperatura del mare è verosimilmente influenzato anche dall'oscillazione atlantica multidecadale (*Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO). Analizzando le temperature superficiali mediterranee dal 1860 circa in poi, Marullo et al. (2011) riscontrano infatti un andamento approssimativamente caratterizzato da un periodo di circa 70 anni, simile a quello dell'AMO, e di ampiezza di circa 0.5°C, che si sovrappone a una tendenza all'aumento dall'inizio del XX secolo. Per questo motivo le tendenze stimate dalle osservazioni disponibili possono essere mascherate da questo andamento di lungo periodo, oltre che dall'elevata variabilità. L'analisi sul periodo 1970-2000 (Solidoro et al., 2009) indica un aumento di salinità in primavera ed estate, potenzialmente legato alla riduzione delle portate fluviali (Zanchettin et al, 2008).

Specificamente per il Golfo di Trieste e per il periodo 1991-2003, Malačič et al. (2006) riscontrano un aumento della temperatura superficiale di circa 0.1 °C/a in primavera ed estate e nessuna variazione significativa nelle altre stagioni; stessi andamenti a 10 m di profondità tranne che in estate la tendenza è di 0.2 °C/a. La salinità superficiale non mostra tendenza significativa in autunno e un aumento a 0.2-0.3 per anno nelle altre stagioni; a 10 m la tendenza è significativa solo in autunno e inverno con 0.1 per anno. Tutto ciò in linea con il riscaldamento atmosferico (fig. 1.1.20) e coerentemente con il riscaldamento dell'Oceano, che è illustrato dalla variazione del contenuto di calore dell'Oceano, ottenuta dall'analisi di vari *data sets*, nello strato superficiale (a) e negli strati profondi (b) (fig. 1.1.21).

fig. 1.1.20 – Temperatura media annuale dell'aria a 10 m e del mare a 2 m di profondità a Trieste. Dati CNR, Istituto di Scienze Marine.

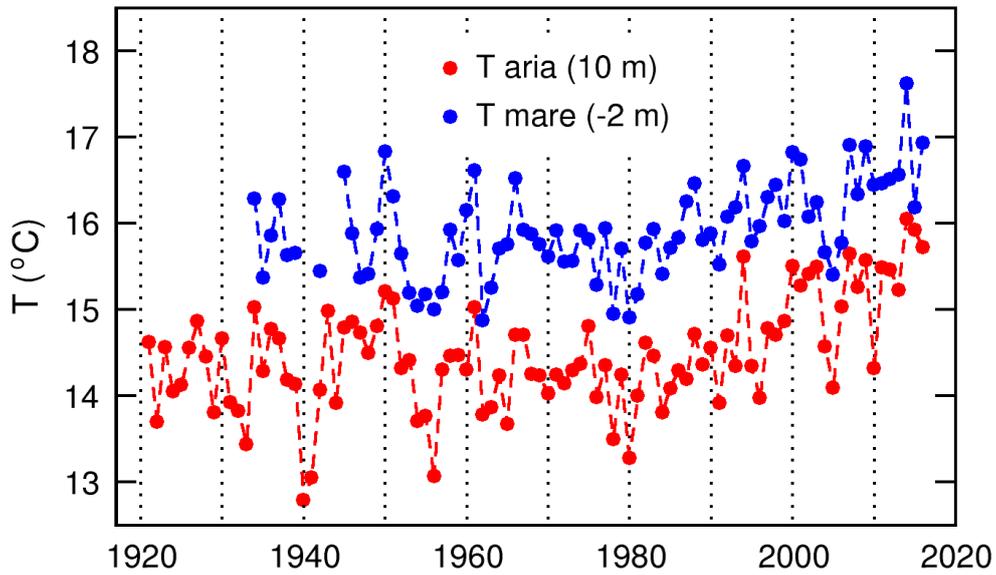
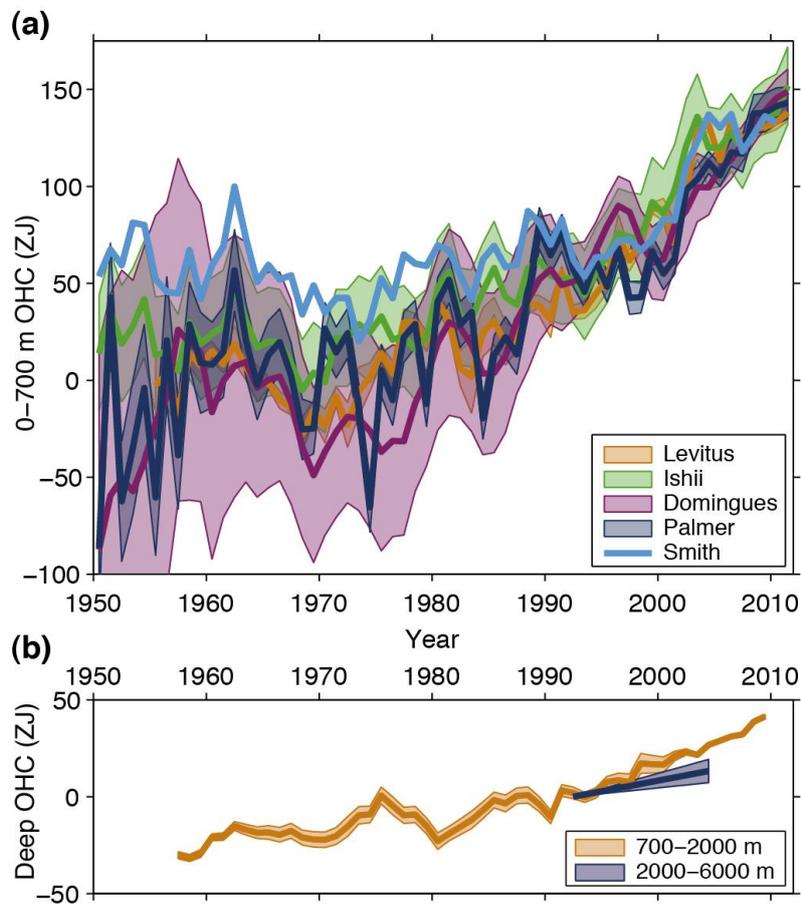



fig. 1.1.21 – Stime annuali, basate su osservazioni, del contenuto di calore dell'oceano globale nello strato 0-700 m (a) e negli strati profondi (b). 1 ZJ = 1 zettajoule = 10^{21} J. (Da: Rhein et al. (2013), fig. 3.2, p. 262.)

Livello medio del mare ed eventi estremi

Il nord Adriatico ha una lunga storia di osservazioni di livello marino relativo, ossia quello osservato localmente rispetto a un caposaldo solidale con il terreno, le cui variazioni comprendono sia le componenti propriamente marine sia i movimenti verticali del terreno. Tre stazioni sono attive da oltre 140 anni, cioè Trieste (inizio nel 1859), Venezia (1871) e Marina di Ravenna, già nota come Porto Corsini (1873). Solo dal 1992 l'altimetria da satellite fornisce misure rispetto a un riferimento globale, perciò quasi tutta la conoscenza sul passato del livello marino nell'area viene dalle misure di livello relativo.

La zona costiera del Friuli Venezia Giulia è soggetta a movimenti verticali del suolo, per lo più dovuti a subsidenza, notevolmente dipendente dal particolare sito. Dallo studio di *marker* geologici, per l'area lagunare di Marano-Grado Antonioli et al. (2009) ricavano velocità medie di subsidenza di 0.4-0.5 mm/a nell'Olocene (ossia negli ultimi 11000-12000 anni). Da livellazioni effettuate tra gli anni '60 del secolo scorso ai primi anni del secolo attuale, si ottengono stime di 0-3 mm/a, ma punte fino a 5 mm/a, a seconda del sito (FVG, 1990; Lama e Corsini, 2000; Marchesini, 2006; Baldin, 2017). In passato, alla subsidenza naturale si è aggiunta anche una componente antropica legata all'estrazione di acqua dal sottosuolo. Sempre da livellazioni, per la zona di Trieste si hanno indicazioni diverse, con prevalente sollevamento del suolo, a velocità media minore di 1 mm/a, dagli anni '50 del secolo scorso, ma recente abbassamento a più di 3 mm/a (Lama e Corsini, 2000; Zambon, 2003, comunicazione personale).

A parte l'effetto della subsidenza, il livello marino relativo osservato a Trieste rappresenta bene quello dell'intera costa regionale. Le caratteristiche del livello marino maggiormente rilevanti per gli scopi del presente lavoro sono le variazioni del livello medio e della frequenza degli eventi estremi.

Coerentemente con l'andamento globale, come illustrato in fig. 1.1.22, su scala secolare a Trieste si riscontra un aumento del livello medio alla velocità media di 1.3±0.2 mm/a (Zerbini et al., 2017). Si tratta di un valore inferiore alla stima globale di 1.7±0.2 mm/a relativa al 1901-2010 (Church et al., 2013), principalmente poiché l'aumento del livello nel Mediterraneo ha subito un'interruzione tra la metà degli anni '60 e l'inizio degli anni '90, per poi riprendere a una velocità molto maggiore di quella media secolare (4.4 mm/a nel 1992-2016 a Trieste) (Marcos e Tsimplis, 2008).

Il livello marino presenta un ciclo stagionale medio dipendente dall'andamento della pressione atmosferica e del regime del vento. Durante il tardo inverno-inizio primavera la pressione presenta il massimo annuale e, attraverso l'effetto barometrico inverso, è la causa principale del minimo annuale del livello marino; a contribuire all'abbassamento del livello c'è anche la frequente presenza di vento continentale (Bora). Nel tardo autunno accade l'opposto, ossia bassa pressione e massimo annuale del livello; in questo caso ad accentuare il fenomeno è la frequente presenza di vento meridionale (Scirocco) lungo l'Adriatico (fig. 1.1.23). La bassa pressione e il vento di Scirocco sono alla base degli eventi di aumento di livello marino, talvolta tali da allagare le aree costiere della Regione, chiamati *storm surges* (noti anche come acqua alta). Questi eventi si osservano soprattutto in autunno-inverno, in occasione della presenza di cicloni sul Mediterraneo occidentale e centrale. Esiste una notevole variabilità nella frequenza degli eventi estremi sia su base interannuale sia interdecadale, come illustrato in fig, 1.1.24 Basandosi sui livelli medi giornalieri osservati, coerentemente con l'aumento del livello medio si nota un aumento del numero di eventi dal 1918 in poi (a) (Raicich, 2010). Se ci si riferisce al solo contributo meteorologico, rimuovendo dai dati osservati l'andamento del livello medio di lungo periodo, la statistica non rivela un significativo *trend*.

fig. 1.1.22 – Livello marino medio annuale a Trieste rispetto allo Zero IGM1942. Dati CNR, Istituto di Scienze Marine.

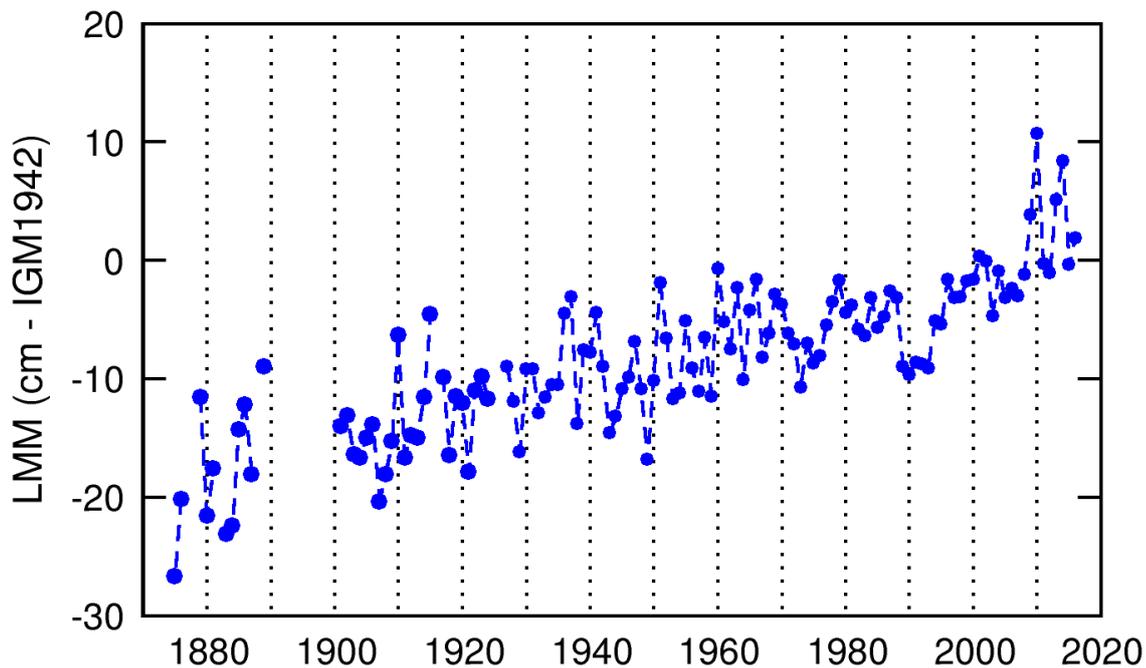



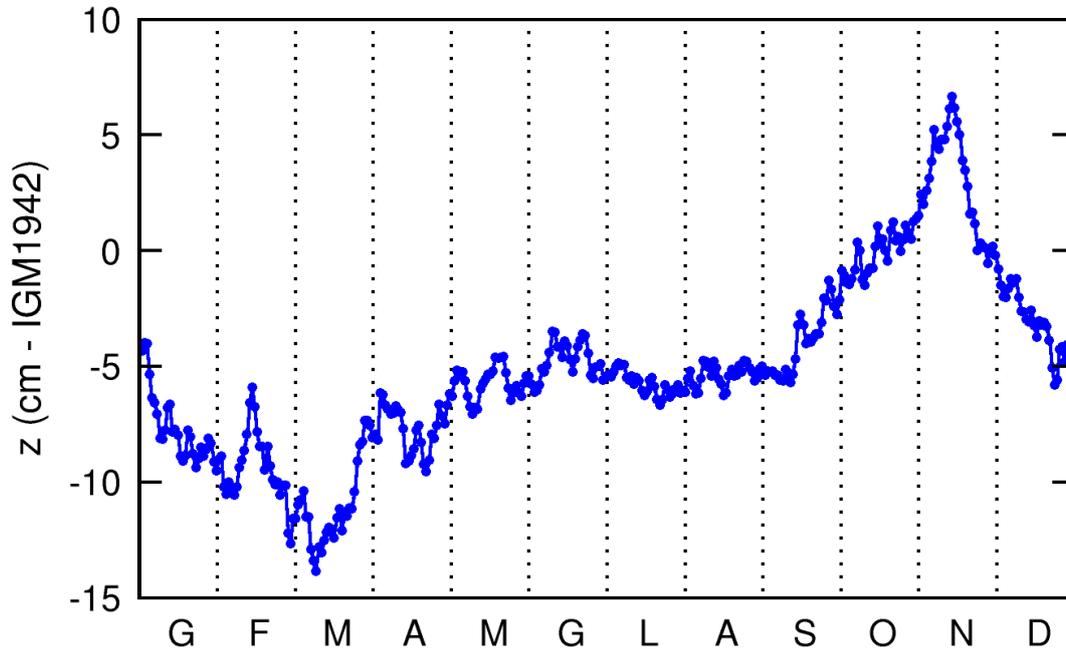
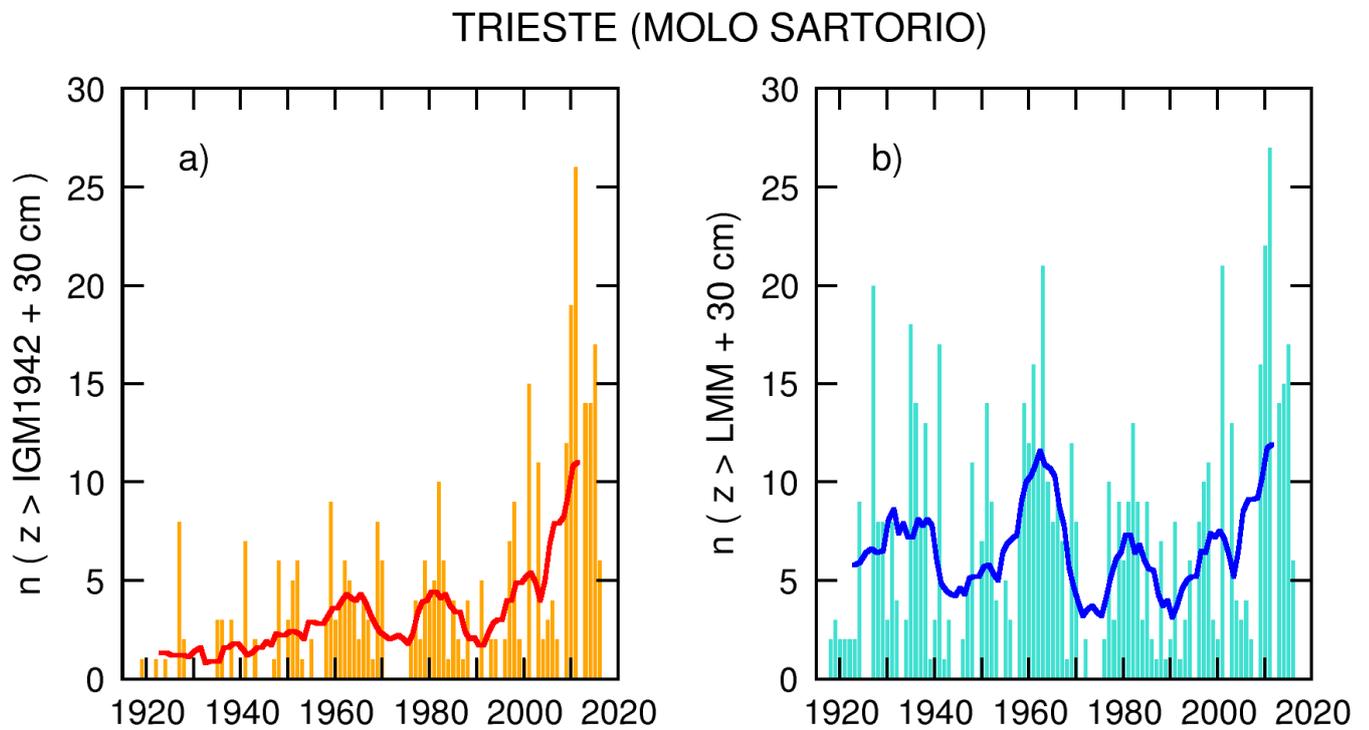
fig. 1.1.23 – Medie giornaliere del livello marino a Trieste rispetto allo Zero IGM1942. Dati CNR, Istituto di Scienze Marine.

Questo indica che le condizioni meteorologiche favorevoli agli eventi, ossia bassa pressione atmosferica e vento meridionale, non presentano significative variazioni in termini di intensità e/o durata (Lionello et al., 2012b; Raicich, 2015).

fig. 1.1.24– Trieste (Molo Sartorio): numero di giorni in cui il livello medio giornaliero supera la quota di 30 cm rispetto allo Zero IGM1942 (a) e il livello medio di lungo periodo (b). Gli istogrammi mostrano i valori annuali e le linee spesse mostrano le medie mobili su 10 anni. Dati CNR, Istituto di Scienze Marine.

Canale di Ponterosso a Trieste.

1.2 VARIABILITÀ CLIMATICA FUTURA

Proiezioni climatiche in FVG

Valentina Gallina, Filippo Giorgi– ICTP

Introduzione metodologica

Un ulteriore aumento delle concentrazioni di gas serra in atmosfera dovrebbe portare ad un riscaldamento del clima globale rispetto alla situazione attuale. L'IPCC ha elaborato diversi scenari di emissioni e concentrazioni di gas serra sulla base di diverse ipotesi di sviluppo socio-economico futuro. In particolare, nel suo quinto rapporto, l'IPCC ha usato tre scenari di riferimento, o *Representative Concentration Pathways* (RCP), da utilizzare come input per le proiezioni climatiche effettuate con modelli climatici globali (GCM). Questi scenari sono: RCP2.6 (target dei 2 °C di riscaldamento rispetto ai valori preindustriali, e quindi circa 1 °C rispetto a quelli attuali), RCP4.5 (scenario intermedio), RCP8.5 (scenario più estremo, o cosidetto *"business as usual"*, con un riscaldamento globale fra i 3.5 ed i 5.5 °C). Il numero associato ad ogni RCP rappresenta il forzante radiativo aggiuntivo dovuto all'aumento dei gas serra una volta ottenuta la stabilizzazione di questi ultimi in atmosfera.

Per ogni scenario, modelli climatici globali, o GCM, sviluppati da laboratori in tutti i continenti sono stati usati per simulare l'evoluzione del clima nel 21mo secolo. Un *downscaling* dinamico con modelli climatici regionali (RCM) è stato poi effettuato per ottenere simulazioni climatiche ad alta risoluzione sulla regione Europea, includendo nello specifico il FVG, nell'ambito dei programmi EURO-CORDEX e MED-CORDEX (www.euro-cordex.net e www.medcordex.eu). Tali simulazioni forniscono una migliore stima dei fenomeni a scala regionale e locale utile per l'analisi degli impatti e dei rischi sui cambiamenti climatici, coprendo il periodo 1970-2100. L'analisi delle proiezioni climatiche per il FVG presentate in questo rapporto è quindi basata sui risultati ottenuti con questi modelli regionali. Nelle simulazioni analizzate, il periodo storico di riferimento si riferisce all'intervallo 1970-2005, mentre lo scenario di cambiamento climatico è considerato quello dal 2006 al 2100.

La risoluzione dei modelli regionali è di circa 12 km (0.11°), con diversi grigliati numerici. Quindi, per poter uniformare tutti i modelli disponibili, i dati sono stati interpolati su un grigliato comune di circa 11 km (0.10°) che copre l'area del FVG (Longitudine 12.30°-14.00°; Latitudine 45.55°-46.75°).

Al fine di ottenere un inquadramento generale sulle proiezioni future dei cambiamenti climatici a livello regionale, sono stati estratti ed analizzati i dati di temperatura e precipitazione fino al 2100, valutando le variazioni (o anomalie) climatiche future in termini di differenze tra il valore di una variabile o di un indice su un periodo futuro e il valore corrispondente nel trentennio climatologico di riferimento 1976-2005.

Un importante elemento nella valutazione di proiezioni future è quello delle incertezze, che sono dovute a vari fattori. Il più importante è l'incertezza associata alle diverse ipotesi di emissioni e concentrazioni future di gas serra, che, come abbiamo visto, può essere molto marcata. Per questo motivo è importante analizzare più di uno scenario, e possibilmente scenari che vadano dal più estremo (RCP8.5) al più mite (RCP2.6).

Un secondo fattore di incertezza è legato al fatto che diversi modelli hanno rappresentazioni di processi fisici (come le nubi, la precipitazione o i processi superficiali) che possono variare molto fra di loro. Quindi ogni modello può rispondere in maniera diversa allo stesso scenario di aumento di gas serra. Per esempio, per lo stesso scenario RCP8.5, il riscaldamento prodotto dai GCMs a livello globale nell'ultimo rapporto IPCC varia dai 3.5 a circa 6 °C. Queste variazioni nella risposta dei modelli sono ancora più marcate a livello regionale o per variabili come la

precipitazione. Per esempio, in quest'ultimo caso spesso i modelli mostrano un disaccordo addirittura nel segno del cambiamento di precipitazione.

Infine, un terzo fattore di incertezza è la variabilità naturale del sistema climatico che, specialmente a scale regionali e locali, è molto accentuata e può mascherare il segnale di cambiamento climatico di origine antropica. Quindi, a causa di tutte queste sorgenti di incertezza nelle proiezioni, è necessario analizzare i risultati di diversi modelli (cioè un "ensemble") piuttosto che di un modello solo, e maggiore è il numero di modelli migliore è la stima dell'incertezza stessa.

Sulla base di queste considerazioni, in questo rapporto sono stati analizzati i risultati del numero maggiore di proiezioni regionali disponibili, per diversi scenari e innestati in diversi GCMs. La lista dei modelli analizzati è riportata nella tab. 1.2.1

tab. 1.2.1 - Modelli disponibili per gli scenari di emissione RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5. Il nome del modello è definito dai nomi del modello globale di circolazione (GCM) e da quello regionale (RCM) utilizzati. La X identifica la presenza del modello nell'ensemble per un determinato scenario RCP. Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Nome modello (GCM_RCM)	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5_CCLM4-8-17	-	X	X
CNRM-CM5_RCA4	-	X	X
EC-EARTH_CCLM4-8-17	X	X	X
EC-EARTH_HIRHAM5	X	X	X
EC-EARTH_RACMO22E	X	X	X
EC-EARTH_RCA4	X	X	X
HadGEM2-ES_CCLM4-8-17	-	X	X
HadGEM2-ES-ICTP-RegCM4	-	-	X
HadGEM2-ES_RACMO22E	X	X	X
HadGEM2-ES_RCA4	X	X	X
IPSL-CM5A-MR_RCA4	-	X	X
MPI-ESM-LR_CCLM4-8-17	-	X	X
MPI-ESM-LR_RCA4	X	X	X
MPI-ESM-LR_REMO2009	X	X	X

Qui ci focalizzeremo soprattutto sugli scenari più estremi (RCP8.5) e più conservatori (RCP2.6), che definiscono l'intervallo di incertezza. Le variabili analizzate sono temperatura e precipitazione, per le quali sono state calcolate diverse statistiche indicanti valori medi ed eventi estremi. Inoltre vengono mostrati sia valori aggregati su tutti i modelli (media di ensemble), per valutare il segnale dominante medio indicato dalle proiezioni, sia i risultati dei modelli singoli per dare un'idea dell'incertezza e dello *spread* fra i diversi modelli.

Risultati e commenti

Il data set: struttura e utilizzo

I data set nell'ambito dei programmi EURO-CORDEX e MED-CORDEX includono un numero relativamente alto di simulazioni caratterizzati da diversi grigliati numerici che, come appena spiegato, sono stati uniformati su un grigliato comune di circa 11 km (0.10°) che copre l'area del FVG (Longitudine 12.30°-14.00°; Latitudine 45.55°-46.75°).

Di conseguenza, all'interno del data set completo (tab. 1.2.1) sono state individuate 5 coppie di modelli che sono stati utilizzati all'interno del Progetto nell'ambito dei casi studio.

I criteri utilizzati per la selezione dei modelli sono:

1) Disponibilità di dati per tutti e tre gli scenari;
2) Inclusione di modelli ad alta, media e bassa sensibilità climatica (i.e. risposta ad un dato aumento di gas serra);
3) Performance relativamente buona nel riprodurre la climatologia per il periodo storico considerato (i.e. 1976-2005).

Sulla base di questi criteri sono state selezionate le seguenti coppie di GCM/RCM:

1) HadGEM2-ES_RACMO22E;
2) MPI-ESM-LR_REMO2009;
3) EC-EARTH_CCLM4-8-17;
4) EC-EARTH_RACMO22E;
5) EC-EARTH_RCA4.

L'approccio ottimale sarebbe quello di elaborare i casi studio usando tutte e cinque le simulazioni almeno per gli scenari RCP8.5 e RCP2.6, così da avere una stima delle incertezze.

Le variabili disponibili per il FVG con risoluzione temporale giornaliera (cioè medie giornaliere eccetto per le temperature giornaliere massima e minima), sono definite nella tab. 1.2.2

I file hanno un formato NetCDF, che hanno la caratteristica di essere file binari auto-descrittivi (cioè includono informazioni circa i dati che contengono) e sono divisi in una parte iniziale (*header*) con le informazioni che descrivono il dato e di un "corpo" dove viene immagazzinato il dato vero e proprio (dati grigliati che evolvono nel tempo).

tab. 1.2.2 – Lista delle variabili disponibili nel data set per il FVG comprensiva di acronimo, nome per esteso e unità di misura. Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Acronimo	Nome esteso ("Inglese" Italiano)	Unità di misura
evspsbl	"Evaporation" Evaporazione	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
hfls	"Surface Upward Latent Heat Flux" Flusso superficiale di calore latente	$W\ m^{-2}$
hfss	"Surface Upward Sensible Heat Flux" Flusso superficiale di calore sensibile	$W\ m^{-2}$
huss	"Near-Surface Specific Humidity" Umidità specifica superficiale	1
mrro	"Total Runoff" Runoff totale	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
pr	"Precipitation" Precipitazione	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
ps	"Surface Air Pressure" Pressione superficiale dell'aria	Pa
rlds	"Surface Downwelling Longwave Radiation" Radiazione superficiale di onde lunghe	$W\ m^{-2}$
rsds	"Surface Downwelling Shortwave Radiation" Radiazione superficiale di onde corte	$W\ m^{-2}$
snw	"Surface Snow Amount" Accumulo di neve superficiale	$kg\ m^{-2}$
tas	"Near-Surface Air Temperature" Temperatura dell'aria vicino al suolo	gradi Kelvin
tasmin	"Daily Minimum Near-Surface Air Temperature" Temperatura minima dell'aria vicino al suolo	gradi Kelvin
tasmax	"Daily Maximum Near-Surface Air Temperature" Temperatura massima dell'aria vicino al suolo	gradi Kelvin
ts	"Surface Temperature" Temperatura al suolo	gradi Kelvin
uas	"Eastward Near- Surface Wind Velocity" Vento da est vicino al suolo	$m\ s^{-1}$
vas	"Northward Near- Surface Wind Velocity" Vento da nord vicino al suolo	$m\ s^{-1}$

Temperatura

La fig. 1.2.3 rappresenta l'andamento dell'anomalia delle temperature invernali (a) ed estive (b) fino al 2100 rispetto al trentennio di riferimento 1976-2005 per gli scenari RCP 2.6 (linea blu), RCP 4.5 (linea verde) e RCP 8.5 (linea rossa). Tali grafici evidenziano l'ammontare dell'incremento della temperatura per il FVG per la media dell'ensemble dei modelli utilizzati a seconda dello scenario futuro considerato. Nello specifico, rispetto alla media del trentennio di riferimento, nel FVG in inverno si potrà assistere ad un aumento medio da circa 1.3 °C (RCP2.6) fino a circa 5.3 °C (RCP8.5), mentre in estate si potrebbe osservare un incremento anche fino a quasi 6 °C (RCP8.5) al 2100, con un aumento anche di circa 2.5 °C al 2050. Da notare che, mentre nello scenario più estremo RCP8.5, le temperature continuano a salire durante il 21mo secolo, negli RCP4.5 e RCP 2.6 si stabilizzano nella seconda parte del secolo. Questo è dovuto all'andamento delle concentrazioni di gas serra che essenzialmente seguono andamenti simili nei due scenari.

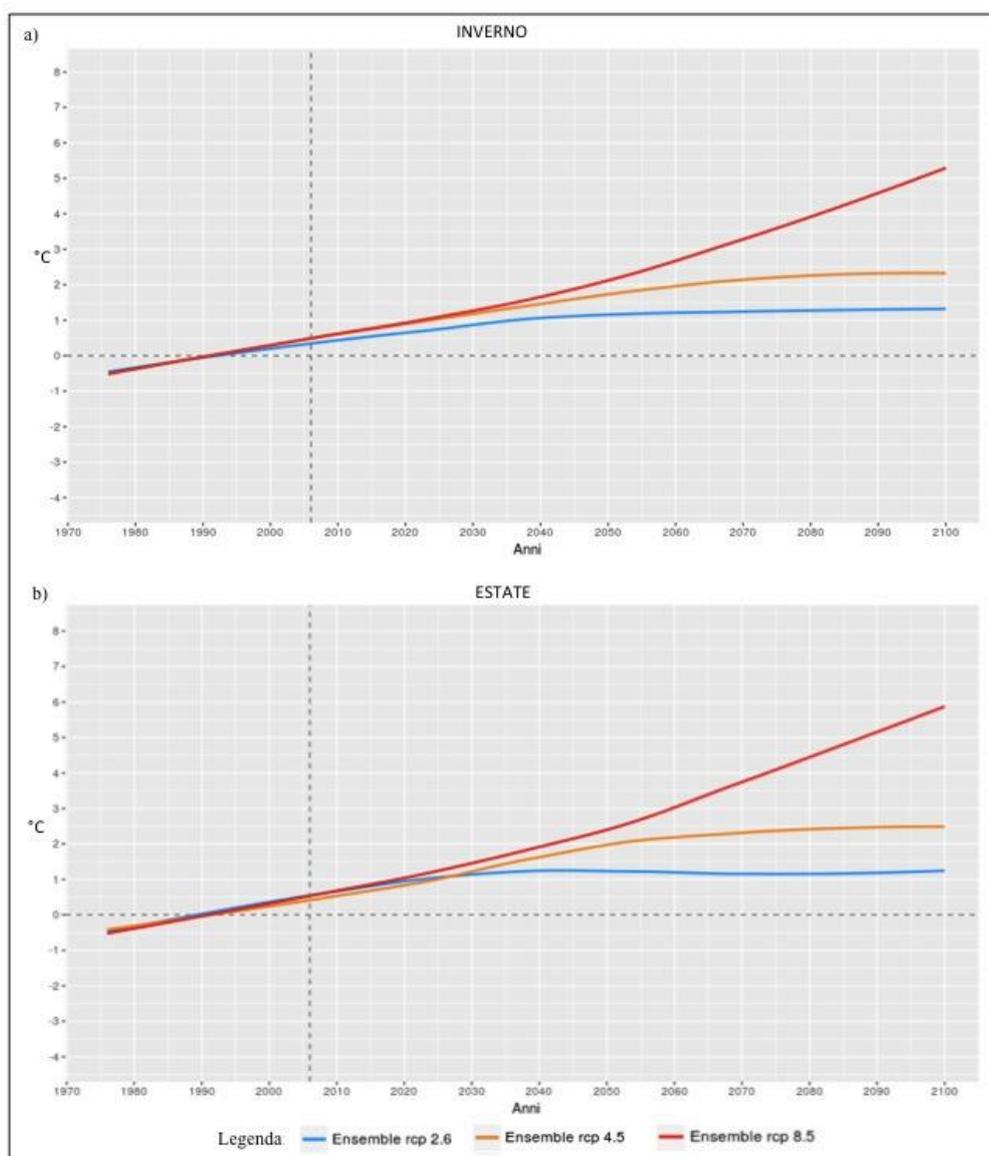



fig. 1.2.3 - Andamento dell'anomalia delle temperature invernali (a) ed estive (b) in Friuli Venezia Giulia fino al 2100 rispetto al trentennio di riferimento 1976-2005 per gli scenari RCP 2.6 (linea azzurra), 4.5 (linea arancione) e 8.5 (linea rossa). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Per semplicità, la fig. 1.2.3 mostra solo l'andamento della media dell'ensemble, ma come abbiamo già menzionato, esiste uno *spread* fra i risultati dei vari modelli, che può essere considerato come una misura dell'incertezza nelle proiezioni. Per dare un'idea di questa incertezza, la fig. 1.2.4 mostra l'andamento delle temperature invernali (DJF) ed estive (JJA) simulate dai diversi modelli sul territorio del FVG per lo scenario RCP8.5.

fig. 1.2.4 - Andamento dell'anomalia delle temperature invernali (a) ed estive (b) in Friuli Venezia Giulia fino al 2100 rispetto al trentennio di riferimento 1976-2005 per lo scenario RCP 8.5, per tutti i modelli disponibili e per la loro media (ensemble, linea rossa). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

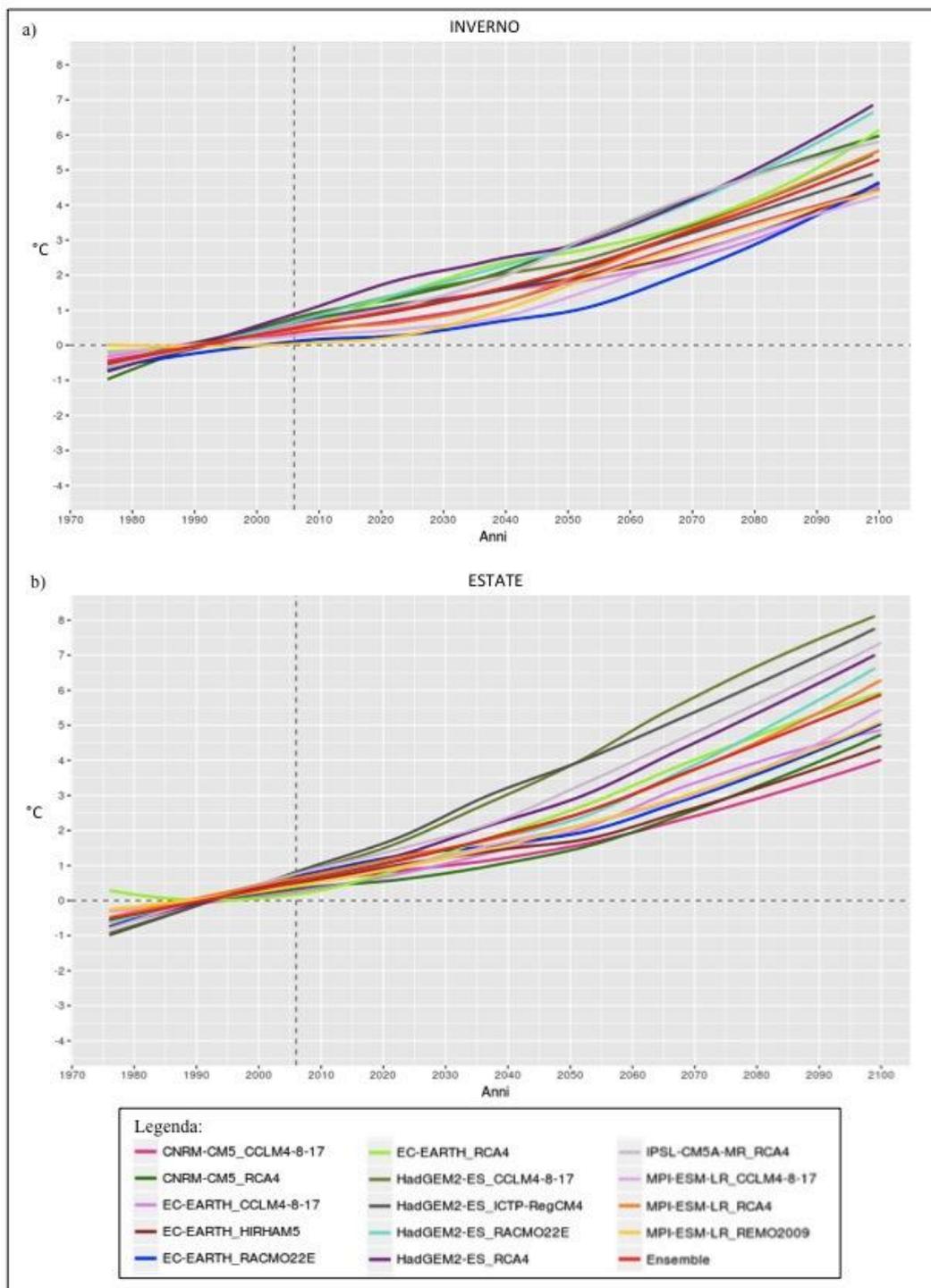
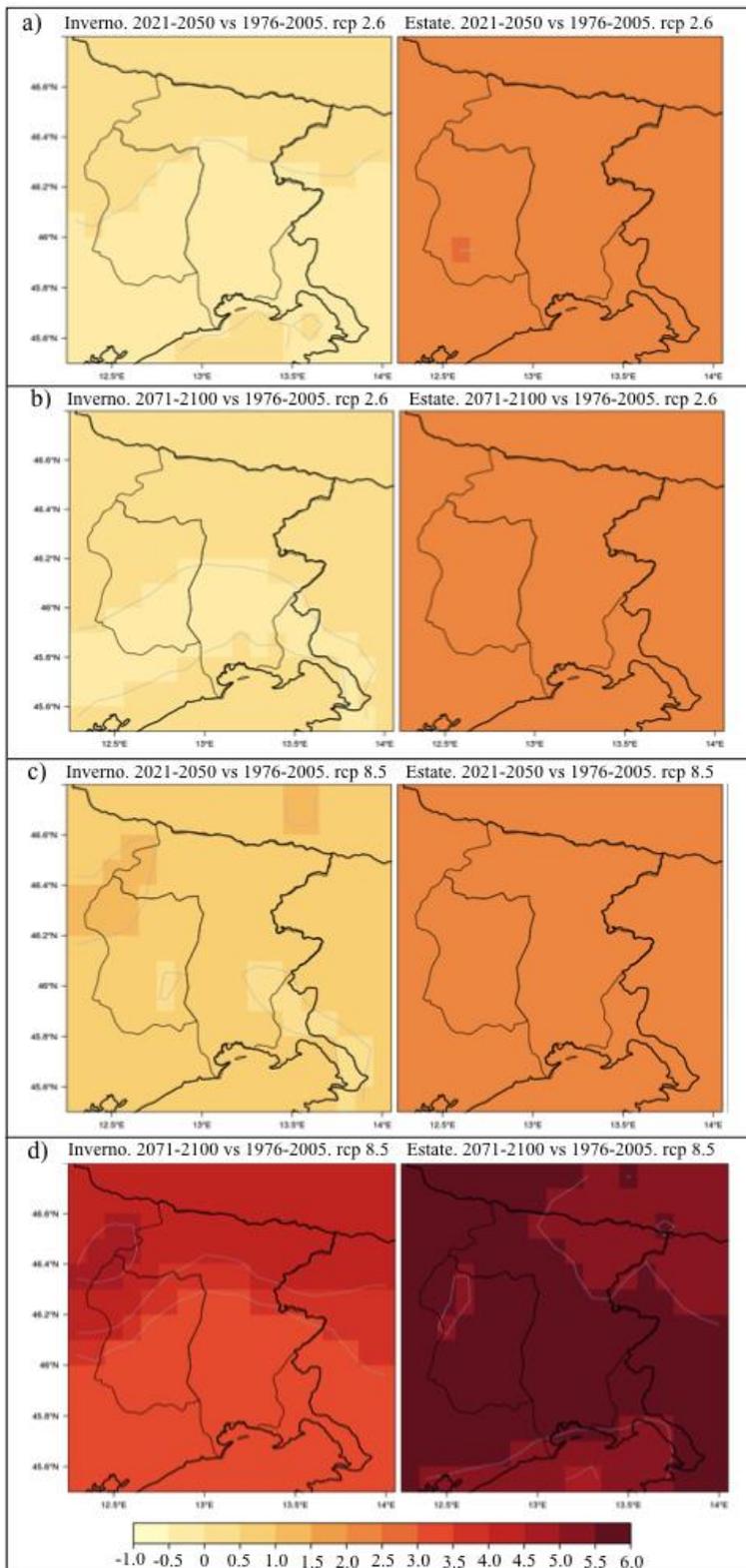



fig. 1.2.5 - Variazione dell'anomalia di temperatura in Friuli Venezia Giulia durante la stagione invernale (colonna sinistra) ed estiva (colonna destra) per lo scenario RCP 2.6 per l'intervallo temporale 2021-2050 (a) e 2071-2100 (b) rispetto al riferimento 1976-2005; analogamente per lo scenario RCP 8.5 (c e d). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Come si può vedere, lo *spread* dei modelli attorno alla media di ensemble al 2100 è di circa +/- 1.5 °C per l'inverno, mentre è maggiore, +/- 2 °C per l'estate. Questo è probabilmente dovuto al fatto che in estate processi locali, come la convezione e gli scambi di calore con il suolo, sono più importanti, ed i diversi modelli hanno diverse rappresentazioni di questi processi. Si vede anche che lo *spread* fra modelli tende ad aumentare nel tempo, specialmente in estate. Come risultato di questo *spread*, si vede che il valore massimo stimato di riscaldamento al 2100 raggiunge i 7 °C in inverno e gli 8 °C in estate.

Per analizzare la distribuzione geografica del riscaldamento nella regione del FVG, la fig. 1.2.5 presenta mappe della media di ensemble dell'anomalia di temperatura per la stagione invernale (colonna sinistra) ed estiva (colonna destra), nello scenario RCP 2.6 per gli intervalli temporali 2021-2050 (a) e 2071-2100 (b) rispetto al riferimento 1976-2005. Analogamente, la stessa analisi è presentata per lo scenario RCP8.5 (i.e. lo scenario IPCC più estremo) nelle quattro mappe dei pannelli c) e d). La fig. 1.2.5 evidenzia come, già per lo scenario RCP2.6, nel periodo di breve e lungo termine (2021-2050, 2071-2100), soprattutto nella stagione estiva (fig. 1.2.5 a e 1.2.5 b, destra), si potrà assistere ad un incremento di 2-3 °C su tutta la regione; mentre d'inverno (fig. 1.2.5 a e 1.2.5 b, sinistra) l'anomalia si assesta attorno a circa 1-2 °C. Tale andamento estivo è previsto anche per lo scenario RCP8.5 nel breve periodo (fig. 1.2.5 c, destra), mentre per il trentennio futuro 2071-2100 (periodo in cui è auspicabile l'attuazione di misure di adattamento, nonché di mitigazione nell'immediato futuro) nell'RCP8.5 (fig. 1.2.5 d, destra) la temperatura potrebbe subire un incremento fino a 5-6 °C. Durante l'inverno, per l'RCP8.5 l'anomalia di temperatura mostra un incremento fino a circa 3 °C nel breve periodo (fig. 1.2.5 c, sinistra), mentre per

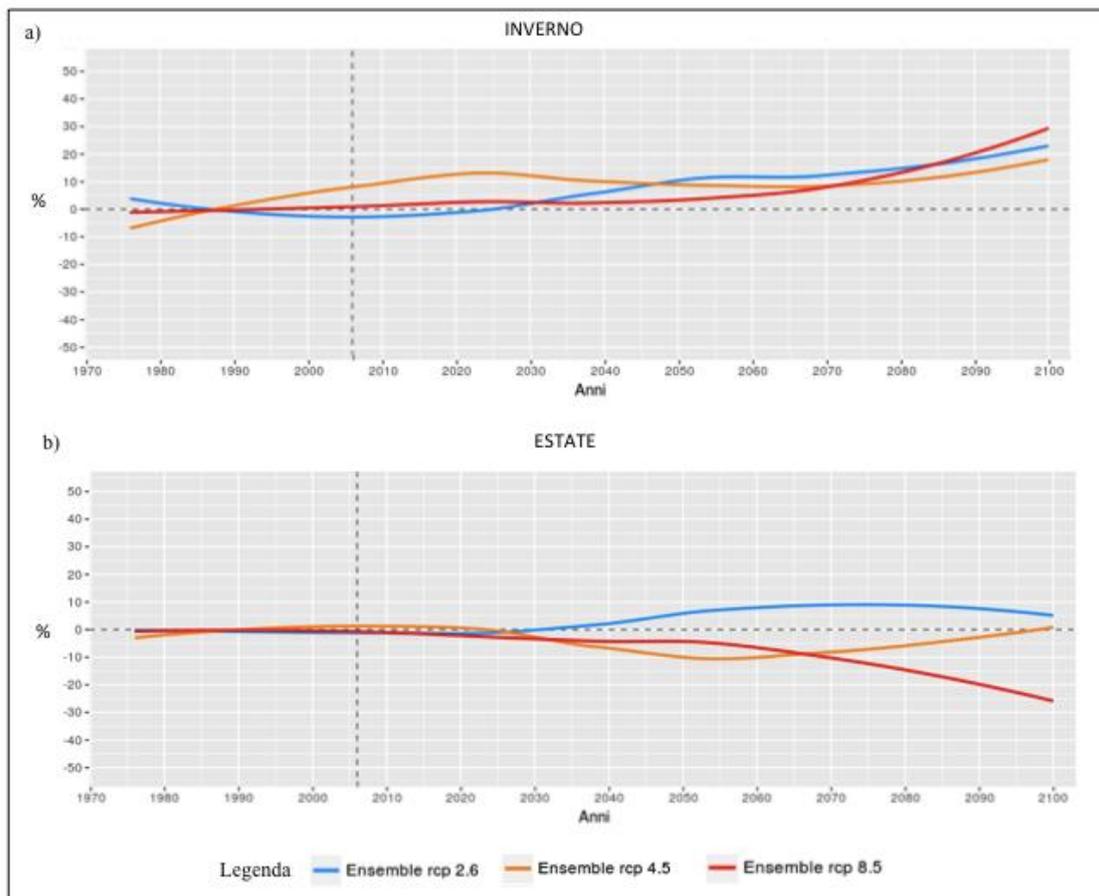
il trentennio 2071-2100 (fig. 1.2.5 d, sinistra) dai 3 °C (dalla costa fino alla zona collinare) ai 5 °C (nella zona prealpina).

Un segnale di conferma in tal senso si riscontra dai dati rilevati da OSMER nell'ultimo decennio rispetto ai dati storici di riferimento che già danno per acquisito un aumento durante la stagione invernale tra 0.5 °C e 1 °C in pianura e, in modo ancora più evidente, un aumento delle temperature estive fra 1 °C e 2 °C.

Infine, la fig. 1.2.5 mostra che, per quanto riguarda il segnale estivo, l'anomalia di riscaldamento è abbastanza omogena all'interno della regione, eccetto per il trentennio 2071-2100, in cui è minore nelle aree nord-orientali. Per il periodo invernale invece, il riscaldamento è maggiore nelle zone settentrionali, alpine e pre-alpine, che in quelle centrali e costiere. Questo probabilmente anche a causa della fusione di ghiacci e neve indotto dalle maggiori temperature.

Precipitazioni

La fig. 1.2.6 mostra la variazione prevista durante il 21mo secolo della precipitazione media in regione rispetto al valore medio di riferimento (2076-2005) nel caso dei tre scenari di concentrazione e delle stagioni invernale (Dicembre-Gennaio-Febbraio) ed estiva (giugno-luglio-agosto). Come per la fig. 1.2.6, il valore riportato è la media dell'ensemble di tutti i modelli.

fig. 1.2.6 - Andamento dell'anomalia delle precipitazioni invernali (a) ed estive (b) in Friuli Venezia Giulia fino al 2100 rispetto al trentennio di riferimento 1976-2005 per gli scenari RCP 2.6 (linea azzurra), 4.5 (linea arancione) e 8.5 (linea rossa). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Si può vedere come per la stagione invernale in tutti e tre gli scenari si prevede un aumento di precipitazione invernale, soprattutto a partire dalla metà del secolo, fino a 20-30 % per la fine del secolo. In estate il segnale è più contrastato, con variazioni entro i +/-10 % negli scenari RCP2.6 e RCP 4.5. Solo lo scenario più estremo RCP8.5 mostra un andamento di chiara diminuzione della precipitazione estiva a partire dalla metà del secolo, fino ad un deficit di circa 25 % a fine secolo. In generale, quindi, i modelli mostrano un segnale dominante di aumento di precipitazione invernale e diminuzione di precipitazione estiva nel caso RCP8.5.

Va però sottolineato che la simulazione della precipitazione è caratterizzata da incertezze maggiori che per la temperatura, perché la precipitazione è un integratore di molti processi di difficile rappresentazione nei modelli climatici. Questa incertezza è illustrata in maniera efficace dalla fig. 1.2.7, che mostra gli andamenti della anomalia di precipitazione invernale ed estiva per il FVG nei diversi modelli dell'ensemble (per lo scenario RCP8.5).

fig. 1.2.7- Andamento dell'anomalia delle precipitazioni invernali (a) ed estive (b) in Friuli Venezia Giulia fino al 2100 rispetto al trentennio di riferimento 1976-2005 per lo scenario RCP 8.5, per tutti i modelli disponibili e per la loro media (ensemble, linea rossa). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

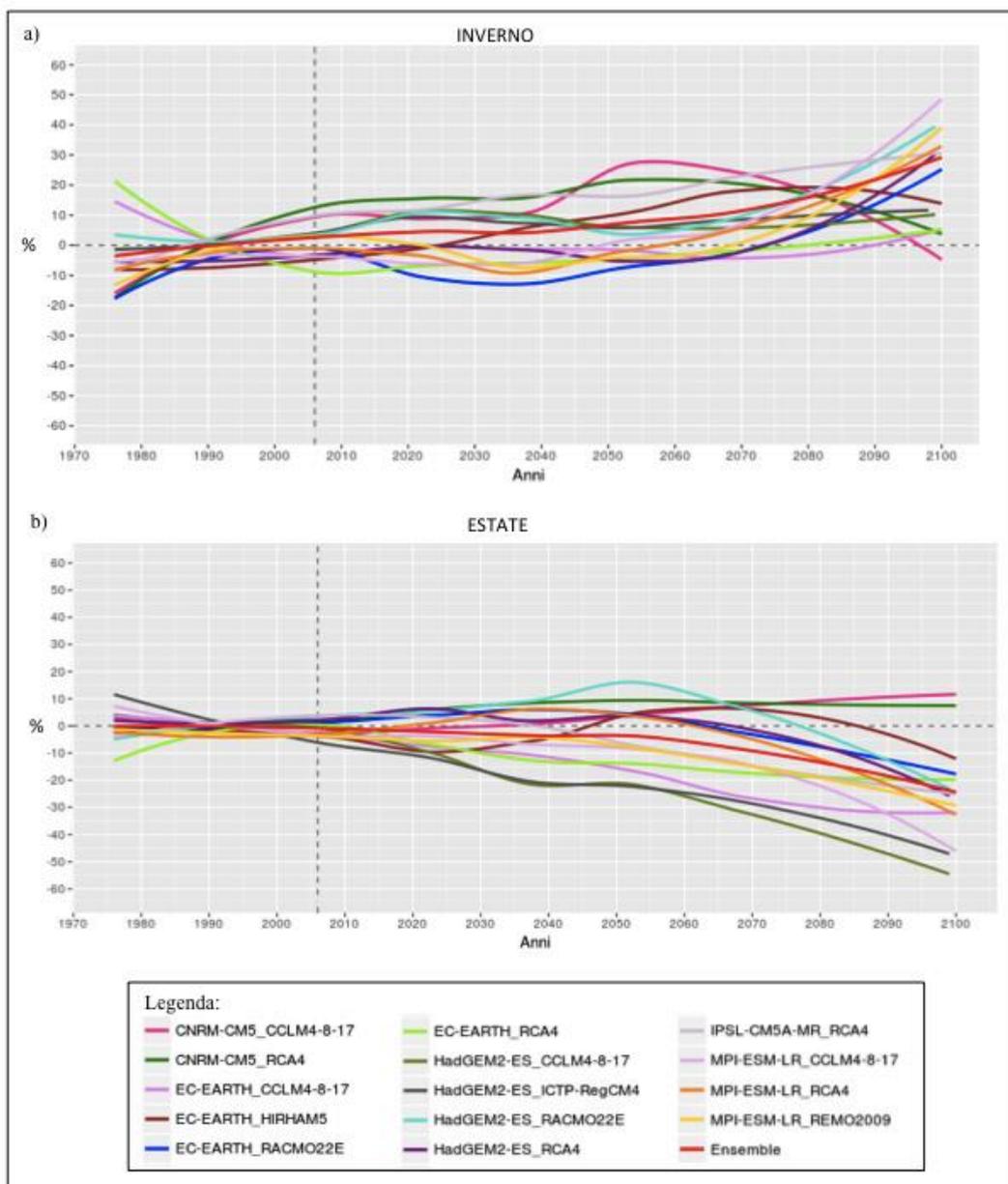
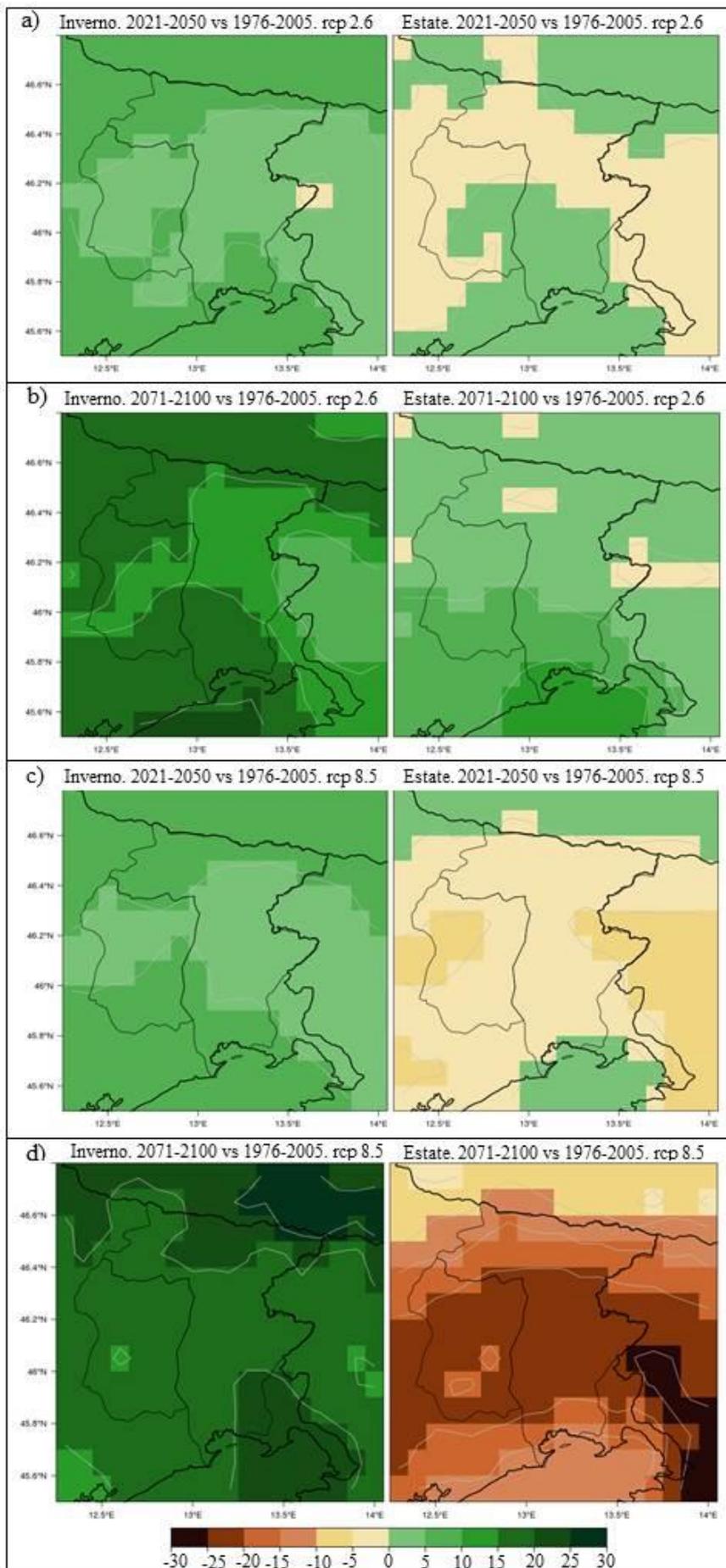



fig. 1.2.8 - Variazione dell'anomalia delle precipitazioni in Friuli Venezia Giulia durante la stagione invernale (colonna sinistra) ed estiva (colonna destra) per lo scenario RCP 2.6 per l'intervallo temporale 2021-2050 (a) e 2071-2100 (b) rispetto al riferimento 1976-2005; analogamente per lo scenario RCP 8.5 (c e d). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Si può chiaramente vedere che lo *spread* fra i modelli, che come abbiamo già discusso è una misura dell'incertezza nella previsione, è molto marcato, con alcuni dei modelli che sono addirittura in controtendenza rispetto alla media di ensemble. Si vede anche come la precipitazione per un'area piccola come il FVG sia caratterizzata da una marcata variabilità interdecadale nei modelli individuali, che viene filtrata quando si prende la media di ensemble per estrarre il segnale comune.

La distribuzione geografica delle anomalie di precipitazione rispetto al periodo di riferimento (1976-2005) per i due periodi futuri e gli scenari RCP2.6 e RCP8.5 sono riportati nella fig. 1.2.8.

In questo caso possiamo notare una maggiore variabilità geografica del segnale rispetto a quello della temperatura. Nell'RCP2.6 in inverno l'aumento di precipitazione è più marcato nelle zone costiere e prealpine/alpine rispetto alle aree centrali della regione, mentre in estate vediamo variazioni generalmente piccole (meno del 5 %) nel periodo 2021-

2050 ed una tendenza ad un leggero aumento nelle zone meridionali per il periodo 2071-2100. Le variazioni nello scenario RCP2.6 sono però generalmente piccole in estate e quindi probabilmente non statisticamente significative.

Il segnale è molto più chiaro nello scenario RCP8.5. Confermando gli andamenti previsti nell'RCP2.6, anche in questo caso in inverno viene previsto un aumento di precipitazione su tutta la regione, ma maggiore nelle zone settentrionali e meridionali. Nella stagione estiva si osserva una marcata diminuzione di precipitazione soprattutto nelle aree centrali della regione e nel periodo più lontano 2071-2100, dove questa diminuzione potrebbe eccedere il 20-25 %.

Sintetizzando i risultati di questa sezione, l'ensemble dei modelli mostra un generale aumento della precipitazione invernale sul FVG in tutti gli scenari, più accentuato nelle regioni settentrionali e centro-meridionali. D'estate un segnale chiaro si trova solo nello scenario più estremo RCP8.5, con una marcata diminuzione di precipitazione soprattutto nelle regioni centrali del FVG. Tuttavia va ricordato che lo *spread* dei modelli, e quindi l'incertezza di queste proiezioni, è relativamente alto.

Eventi estremi

In questa sezione analizzeremo i cambiamenti previsti dai modelli in alcuni indicatori di eventi estremi, sia di carattere termico che idro-climatico, di interesse per i possibili impatti su società ed ecosistemi naturali.

Un indice rappresentativo di eventi estremi termici è quello delle ondate di calore, definite come periodi di giorni consecutivi in cui l'anomalia termica giornaliera è al di sopra di una data soglia. Le soglie che vengono tipicamente usate per caratterizzare le ondate di calore sono sequenze di 5 giorni consecutivi in cui la temperatura è maggiore di 5 °C rispetto alla media di riferimento per quel giorno dell'anno. Questo indice di ondate di calore è stato elaborato sulla regione FVG per la stagione estiva e gli intervalli futuri 2021-2050 e 2071-2100, per essere confrontato con i valori relativi al trentennio 1976-2005 e per gli scenari RCP2.6 e RCP8.5. Da notare che le anomalie per i periodi futuri sono calcolate rispetto alla media del periodo di riferimento, dato che si vogliono identificare periodi particolarmente caldi rispetto al clima presente. Quindi, il calcolo delle ondate di calore future è influenzato sia dal riscaldamento medio che da eventuali modifiche della variabilità interannuale.

La fig. 1.2.9 riporta il numero medio di giorni di ondate di calore per stagione nel periodo di riferimento e in quelli futuri. La media è calcolata su tutto l'ensemble dei modelli disponibili.

Notiamo prima di tutto, che nel periodo di riferimento (cioè in condizioni attuali) il numero medio di giorni di ondate di calore per stagione è inferiore a 5, e quindi che in media c'è meno di un'ondata di calore per stagione. Questo ci mostra che le soglie scelte corrispondono effettivamente ad eventi termici molto estremi.

La fig. altresì evidenzia che già per lo scenario RCP2.6 si prevedono da 5 a 10 giorni in cui le temperature saranno maggiori di 5°C rispetto alla media del 1976-2005; quindi le ondate di calore estive così calcolate saranno in media 1 o 2 all'anno, essenzialmente più del doppio di quelle attuali. In riferimento allo scenario RCP8.5, se per il breve periodo le ondate di calore estive si assestano su 1 o 2 all'anno come per l'RCP2.6, per il trentennio 2071-2100, si arriverà in pianura ad avere anche 40 giorni in cui le temperature estive saranno di almeno 5 °C superiori alla media di riferimento in un anno (i.e. 8 eventi di ondate di calore, più di un mese, ogni estate). Ciò può significare che in futuro la maggior parte dell'estate sarà interessata da ondate di calore (come nell'estate del 2003), provocando importanti conseguenze sulla salute umana, sui raccolti e l'allevamento, sui ghiacciai e sugli ecosistemi più vulnerabili. Un ulteriore indicatore di stress termico è il numero di giorni in cui la cui temperatura massima eccede i 30 °C ed il numero di notti in cui la temperatura minima eccede 20 °C.

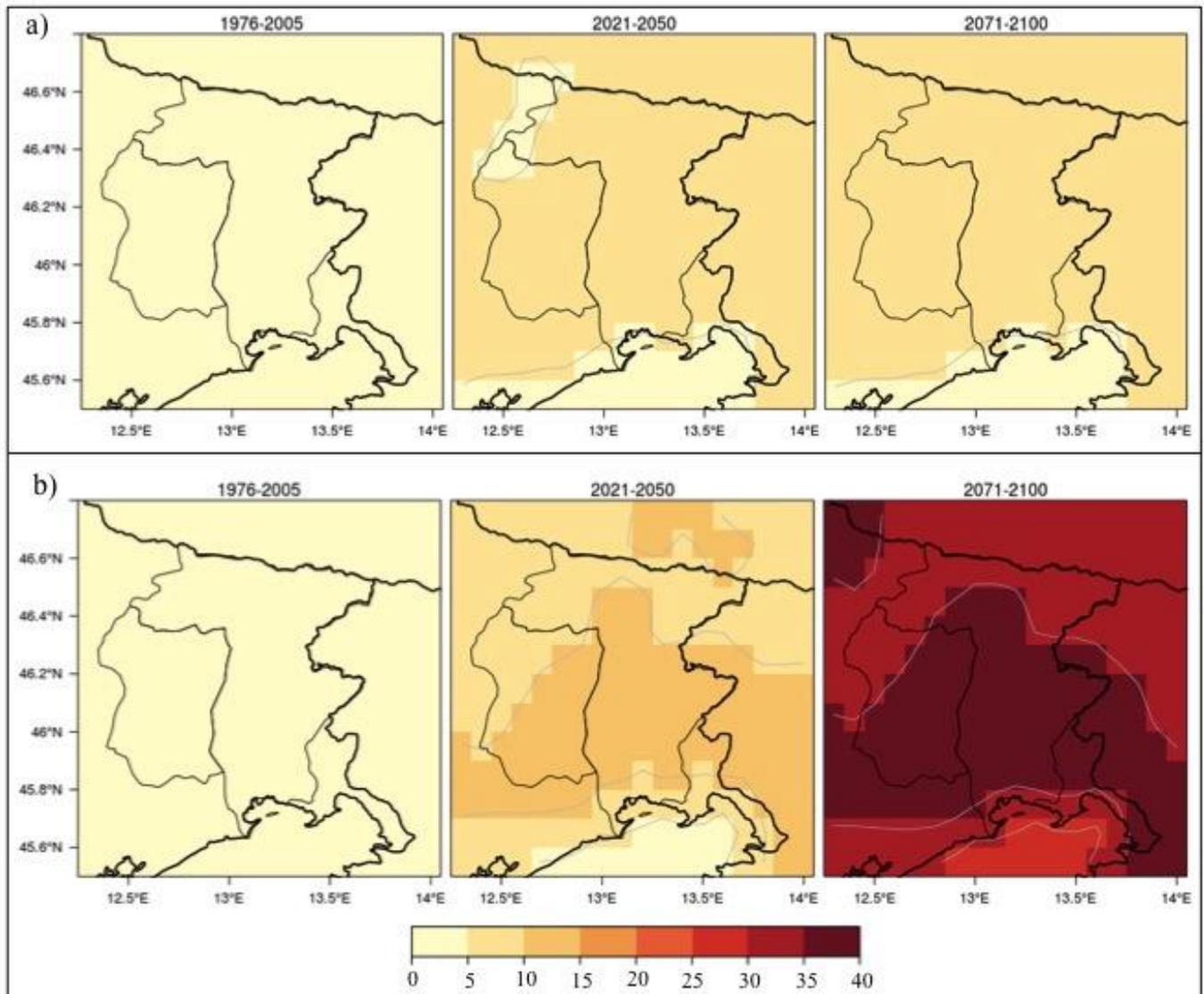
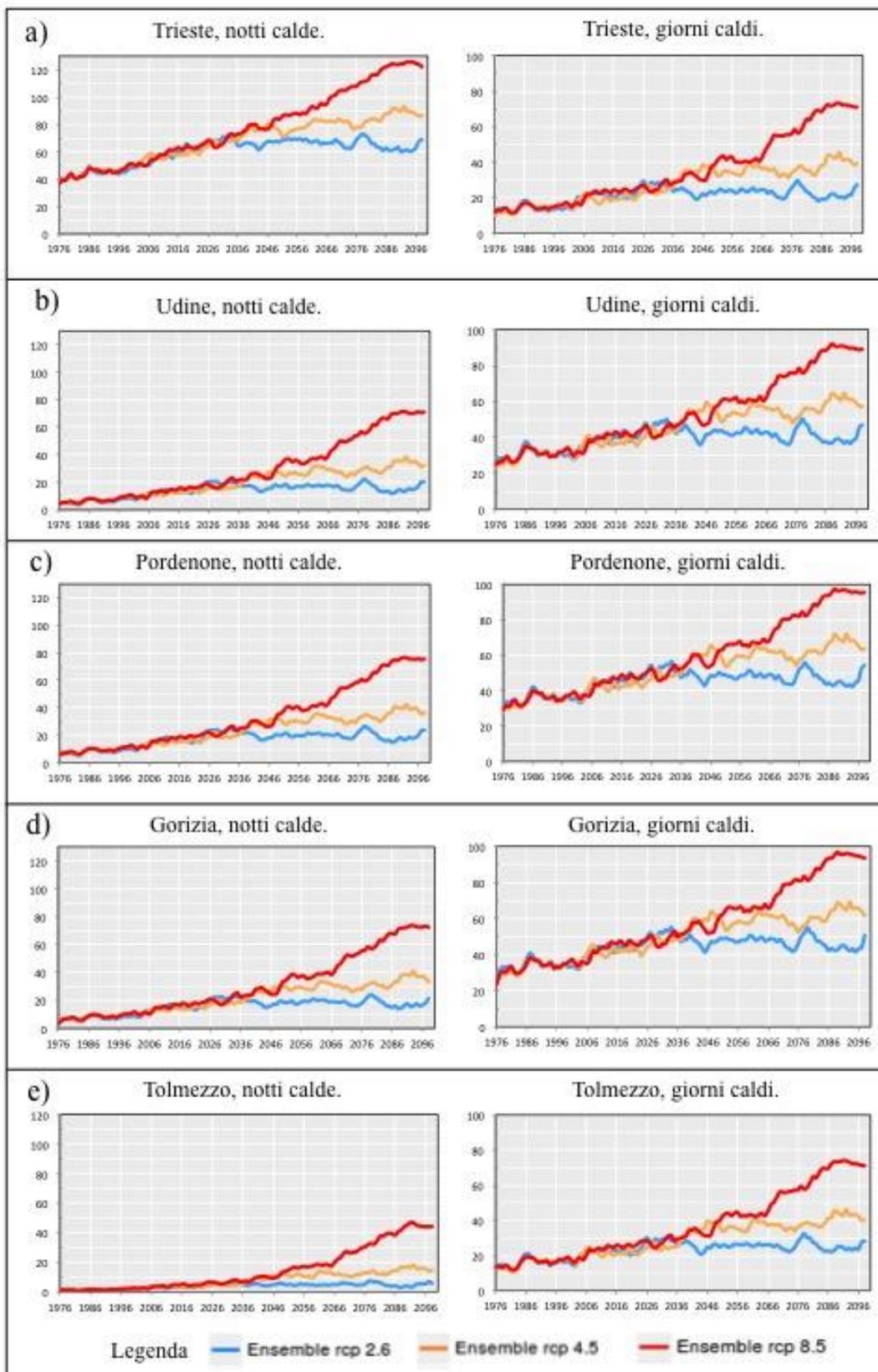
fig. 1.2.9 - Anomalie delle ondate di calore previste in Friuli Venezia Giulia considerando 5 giorni consecutivi in cui la temperatura sarà maggiore di 5 °C rispetto alla media di riferimento negli intervalli futuri 2021-2050 e 2071-2100 rispetto al trentennio 1976-2005 per gli scenari RCP 2.6 e 8.5 (rispettivamente a e b). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Dato che queste metriche dipendono dal valore assoluto delle temperature, e non dalle anomalie come nel caso delle ondate di calore, è possibile che siano influenzate da *bias* sistematici nei modelli. Per ovviare a questo problema è stata effettuata una cosiddetta *bias-correction* usando dati osservati per cinque località del FVG: Trieste, Udine, Gorizia, Pordenone e Tolmezzo (quest'ultima rappresentativa di località montane). Gli andamenti del numero di giorni e notti calde per le 5 località sono poi stati calcolati per le simulazioni del 21mo secolo. Il processo di *bias-correction* per le temperature consiste sostanzialmente nel correggere le temperature del modello a livello mensile con una quantità pari e di segno opposto al *bias* del modello stesso rispetto alle osservazioni per il periodo di riferimento 1986-2005. La fig. 1.2.10 riporta la media di ensemble delle proiezioni del numero di notti e giorni caldi (cioè con temperature superiori alle soglie di 20 °C e 30 °C, rispettivamente) nelle cinque località summenzionate per i tre scenari di concentrazione.

fig. 1.2.10 - Media quinquennale di ensemble delle proiezioni del numero di notti e giorni caldi (cioè con temperature minime e massime rispettivamente superiori alle soglie di 20 °C e 30 °C) nelle cinque località (Trieste, Udine, Pordenone, Gorizia, Tolmezzo) per gli scenari RCP 2.6 (linea azzurra), 4.5 (linea arancione) e 8.5 (linea rossa). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

La località di Trieste, rappresentativa delle aree costiere, è quella con il maggior numero di notti calde, circa 40 nel periodo 1976-1985, ed il minor numero di giorni caldi, dai 10 ai 20 nello stesso periodo. Il numero di notti calde a Trieste aumenta linearmente a causa del riscaldamento globale fino a valori attorno a 70 nel 2035 per poi stabilizzarsi alla fine del secolo attorno ai 70 nell'RCP2.6, 80-90 nell'RCP4.5 e oltre i 120, quindi un incremento del 300 %, nel caso del RCP8.5. Il numero di giorni caldi a Trieste mostra un incremento minore, attestandosi per la fine del secolo, attorno ai 20-30 nel RCP2.6, 40 nel RCP4.5 e 70 nel RCP8.5 (che in ogni caso rappresenta un aumento di più del 300 %). Nelle zone costiere quindi l'aumento di notti calde sembra essere il problema principale di stress termico.

L'andamento sia delle notti che dei giorni caldi nelle tre località di pianura (Udine, Pordenone e Gorizia) è abbastanza simile. Il numero di notti calde aumenta da valori attorno ai 5-10 nel 1976-85 fino a valori sui 20 (RCP2.6), 30-40 (RCP4.5) e 70-80 (RCP8.5) per la fine del 21mo secolo. Il numero di giorni caldi, invece, aumenta da valori attorno ai 20-30 nel 1976-85 fino a 40-50 (RCP2.6), 60-70 (RCP4.5) e 90-100 (RCP8.5) per il 2100. Rispetto a Trieste quindi osserviamo un maggior numero, e maggior aumento, di giorni caldi, ed un minore numero (e aumento) di notti calde.

Infine, la località montana di Tolmezzo vede un aumento di notti calde da una quasi assenza nel 1976-85 a circa 15 (RCP2.6), 15 (RCP4.5) e 45 (RCP8.5) e un aumento di giorni caldi da circa 10-20 nel 1976-85 a 20-30 (RCP2.6), 40-50 (RCP4.5) e 70-75 (RCP8.5) per la fine del secolo. Dalla fig. 1.2.11, dunque, si evince chiaramente che per lo scenario RCP8.5 lo stress termico associato sia a giorni che notti calde aumenta considerevolmente in risposta al riscaldamento globale.

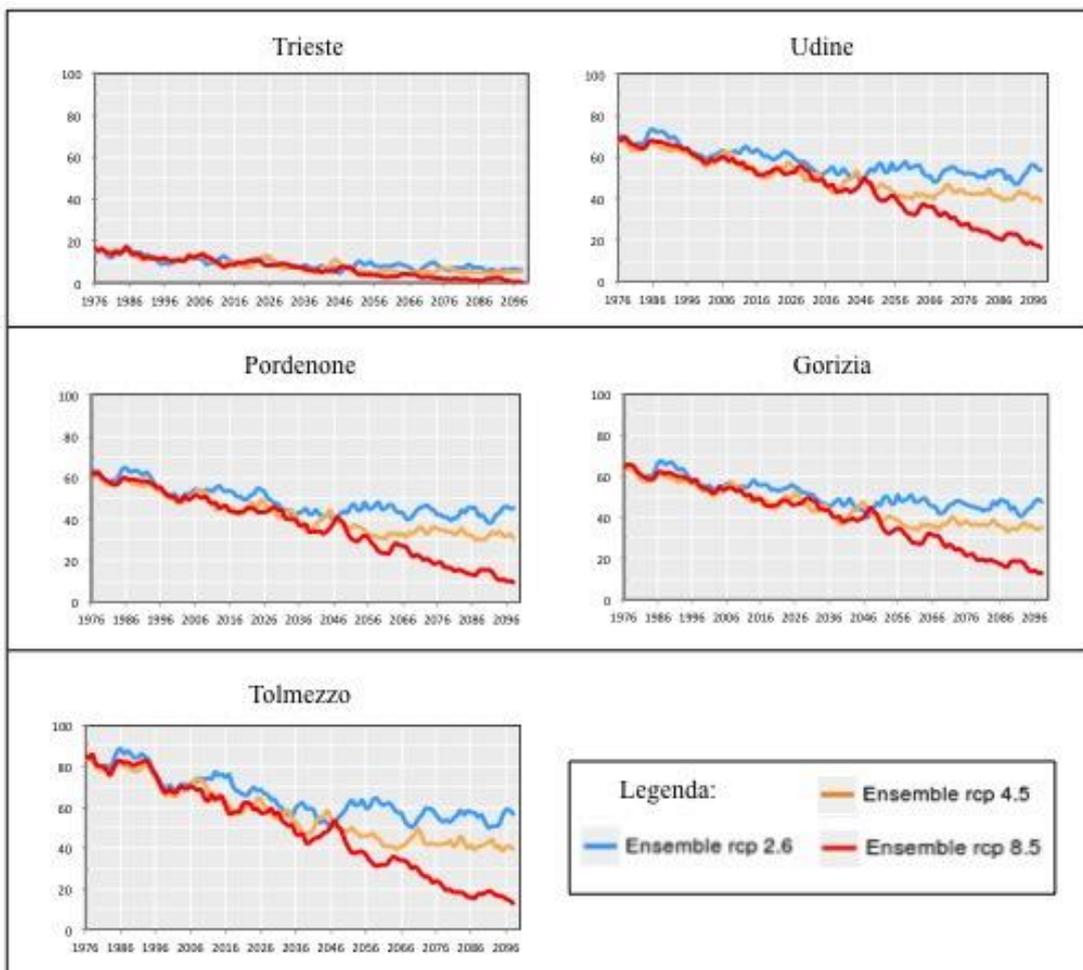



fig. 1.2.11 - Media quinquennale di ensemble delle proiezioni del numero di giorni di gelo (cioè con temperature minime inferiori a 0 °C) nelle cinque località (Trieste, Udine, Pordenone, Gorizia, Tolmezzo) per gli scenari RCP 2.6 (linea azzurra), 4.5 (linea arancione) e 8.5 (linea rossa). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Il riscaldamento globale dovrebbe portare non solo ad un aumento di eventi termici di caldo estremo, ma anche ad una riduzione degli eventi freddi. La fig. 1.2.12 mostra l'andamento del numero di giorni di gelo per anno nelle stesse 5 località della fig. 1.2.10, come stimati dall'ensemble dei modelli per i tre scenari dopo avere applicato la procedura di *bias-correction* descritta precedentemente.

Anche qui troviamo una differenza sensibile fra la località costiera di Trieste, le località interne di pianura (Udine, Pordenone e Gorizia) e la località montana di Tolmezzo. A Trieste i modelli prevedono una diminuzione dei giorni di gelo da valori attorno ai 10-20 nella fine del 20mo secolo a valori minori di 10 per RCP4.5 e RCP2.6, e addirittura una totale scomparsa per il RCP8.5, per la fine del 21mo secolo. Il numero di giorni di gelo è più alto nelle tre località interne, fra i 60 e 70, nel 1976-1985, per diminuire drasticamente fino a valori attorno ai 10 nel RCP8.5 per la fine del 21mo secolo (fra i 30 e i 50 per RCP4.5 ed RCP2.6). A Tolmezzo nel periodo di riferimento troviamo circa 80 giorni di gelo, quasi 3 mesi, che vengono anche in questo caso ridotti a circa 10 nel RCP8.5 per la fine del secolo.

Passiamo ora all'analisi degli eventi estremi idro-climatici, cioè di quegli eventi che potrebbero per esempio portare a fenomeni alluvionali o di forte erosione. Uno degli indicatori che vengono comunemente usati per identificare questi eventi è il cosiddetto 95mo percentile della distribuzione delle precipitazioni giornaliere. Questo indice essenzialmente identifica la soglia di intensità di precipitazione al di sopra della quale si trova il 5% degli eventi più intensi e quindi più dannosi. Questa soglia viene normalmente calcolata per un periodo di riferimento (nel nostro caso 1986-2005) e viene poi usata anche come identificatore degli eventi più intensi nei periodi futuri.

La fig. 1.2.12 presenta la differenza percentuale di precipitazione al di sopra del 95mo percentile per i due periodi temporali futuri 2021-2050 e 2071-2100 rispetto al periodo di riferimento 1986-2005 per i due scenari RCP2.6 e RCP8.5 e le stagioni invernali (DJF) ed estive (JJA).

Analogamente, la fig. 1.2.13 presenta la stessa informazione ma per il cambiamento del numero dei giorni in cui la precipitazione è maggiore del 95mo percentile di riferimento. Il raffronto delle fig. 1.2.12 e fig. 1.2.13 con la fig. 1.2.8 mostra un sostanziale accordo fra i cambiamenti di precipitazione media e quelli di precipitazione estrema, almeno dal punto di vista qualitativo e soprattutto per lo scenario RCP85. Quindi in inverno vediamo un aumento di precipitazione media, della precipitazione estrema e dei giorni di precipitazione estrema, mentre in estate si osserva una diminuzione in tutte e tre le grandezze. Il segnale poi aumenta in maniera consistente nel periodo più lontano, 2071-2100, rispetto a quello più prossimo, 2021-2050. Un elemento interessante di questo confronto è che mentre l'entità del cambiamento di precipitazione intensa è in linea con quella della precipitazione media, il cambiamento nel numero di giorni con precipitazione intensa è minore. Questo vuole dire che in media l'intensità dei singoli eventi estremi tende a variare più marcatamente.

fig. 1.2.12 - Variazione dell'anomalia delle precipitazioni cumulate oltre il 95esimo percentile per i trentenni 2021-2050 (colonna sinistra) e 2071-2100 (colonna destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 per gli scenari RCP 2.6 (a e b) e 8.5 (c e d). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

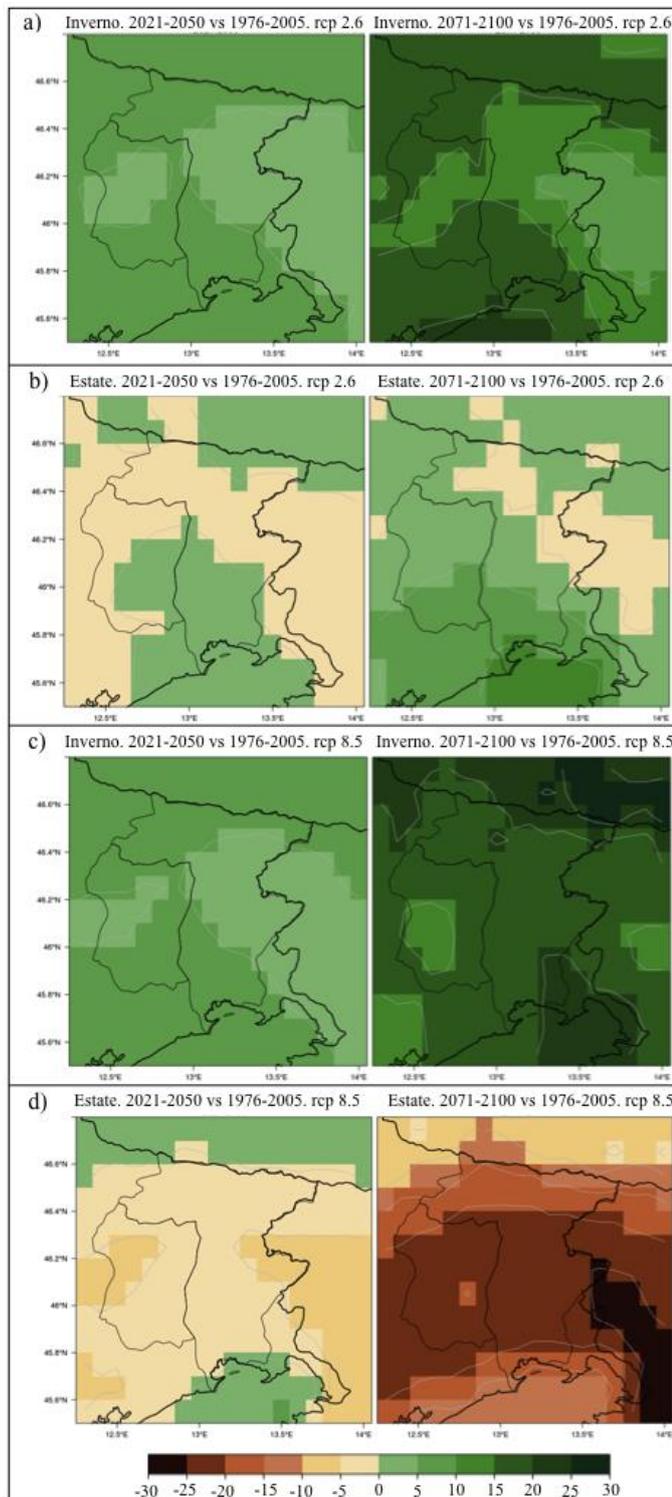
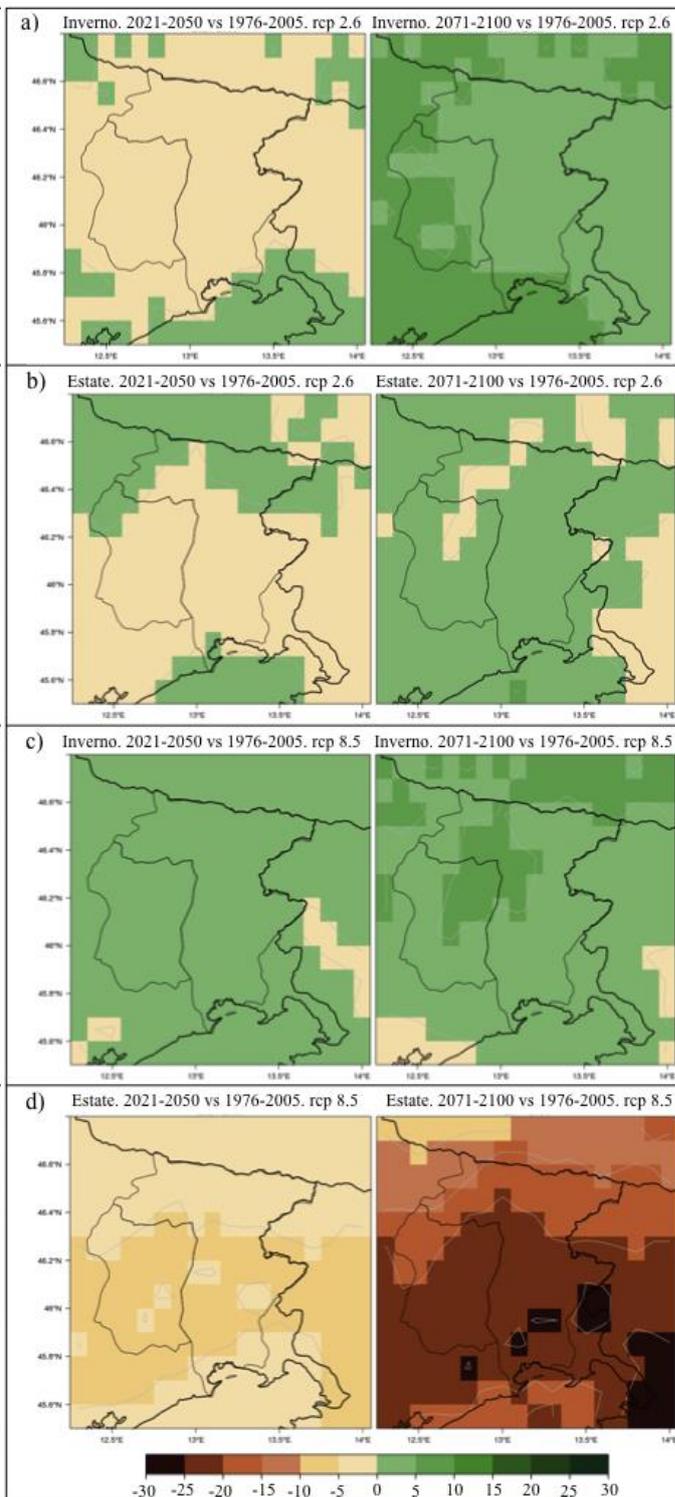



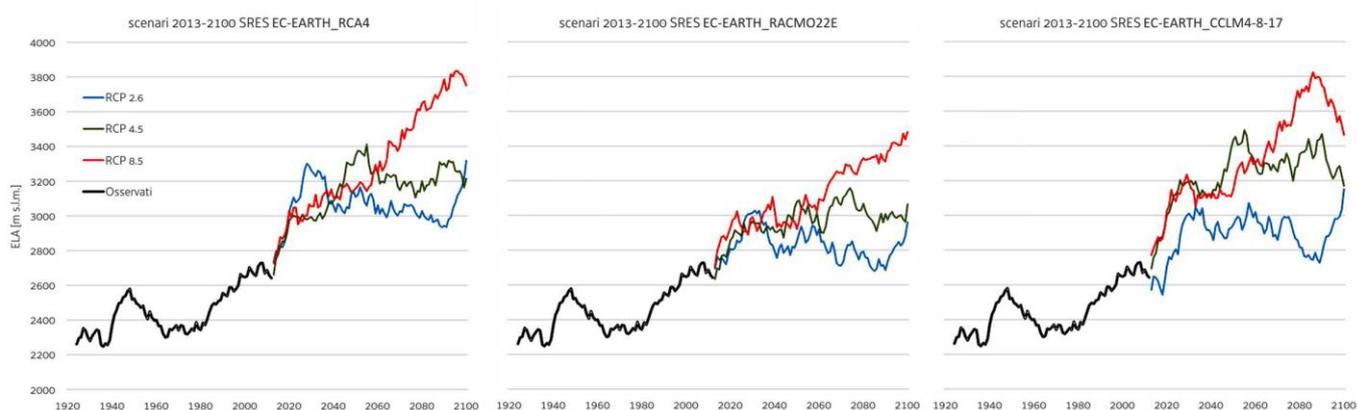
fig. 1.2.13 - Variazione dell'anomalia di giorni con precipitazioni oltre il 95esimo percentile per i trentenni 2021-2050 (colonna sinistra) e 2071-2100 (colonna destra) rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 per gli scenari RCP 2.6 (a e b) e 8.5 (c e d). Fonte: ICTP, Earth System Physics.

Criosfera

Renato R. Colucci -CNR- ISMAR U.O.S. di Trieste

La criosfera del FVG è fortemente influenzata dalle condizioni atmosferiche di medio/lungo periodo dalla scala locale a quella globale, e da cause geomorfologiche e topografiche.

Mantenendo il focus sull'evoluzione degli apparati glaciali che caratterizzano le Alpi Giulie, unica zona della Regione FVG che ancora ne preserva un certo numero anche se con limitata attività, Il parametro che probabilmente meglio descrive la loro evoluzione è la ELA. Le proiezioni sulla sua possibile evoluzione sono state realizzate sulla base di cinque coppie di GCM/RCM realizzati dall'ICTP per questo lavoro. Queste proiezioni sono come è noto caratterizzate da incertezze intrinseche al modello che possono solo approssimare la realtà. In queste simulazioni è difficile tener conto di come, ad esempio, la frequenza delle valanghe possa modificarsi in futuro, fattore che dipende oltre che dal quantitativo di precipitazione nevosa caduta, anche dalla morfologia del terreno e da come i processi geomorfologici potranno modificare il paesaggio. Va anche ricordato come la ELA dipenda strettamente sia dalle temperature sia dalle precipitazioni, e come sia la modulazione di questi due parametri a determinarne l'oscillazione altitudinale.

Ciò premesso sono stati correlati gli scenari di temperatura media estiva (mesi di giugno, luglio ed agosto) e di precipitazione totale annua previsti dalle cinque coppie di modelli investigati al fine di estrapolare l'altezza della linea di equilibrio dei ghiacciai (fig. 1.2.14). La combinazione delle varie proiezioni, pur con alcune differenze sostanziali, permette una stima della probabile evoluzione della ELA da qui al 2100 per i tre scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Le curve previste si correlano bene, in particolare nella proiezione SRES EC-EARTH_RACMO22E, con la curva della ELA calcolata in base ai dati osservati dal 1920 al presente.

fig. 1.2.14 - Proiezioni relative all'altitudine della linea di equilibrio dei ghiacciai (ELA) negli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

In tutte e tre le proiezioni degli scenari RCP4.5 e RCP8.5 la ELA, ora attestata attorno ai 2700 m di altitudine, è prevista salire al di sopra dei 3000 m già attorno al 2030. Solamente gli scenari RCP 2.6 delle proiezioni EC-EARTH_CCLM4-8-17 e _RACMO22E vedono un assestamento attorno a quella quota sempre per il 2030 con una successiva graduale stabilizzazione su quote leggermente inferiori. In tutti gli scenari *business as usual* la ELA è prevista superare la quota di 3400 m, ed in alcune simulazioni quella di 3800 m. Questi scenari estremi alzando di

800-1000 m di quota la presente ELA, porterebbero verosimilmente alla totale scomparsa di qualsiasi forma di criosfera permanente sul territorio del FVG, ivi compresi il ghiaccio sotterraneo (*ice caves*) e le possibili sacche di permafrost sporadico ancora presenti. Gli scenari RCP4.5 e RCP2.6, invece, pur portando ad una ulteriore forte contrazione della criosfera presente, potrebbero garantire la sopravvivenza di minime porzioni di depositi di ghiaccio permanente al di sotto di coperture detritiche o in cavità sotterranee di alta quota.

Mare

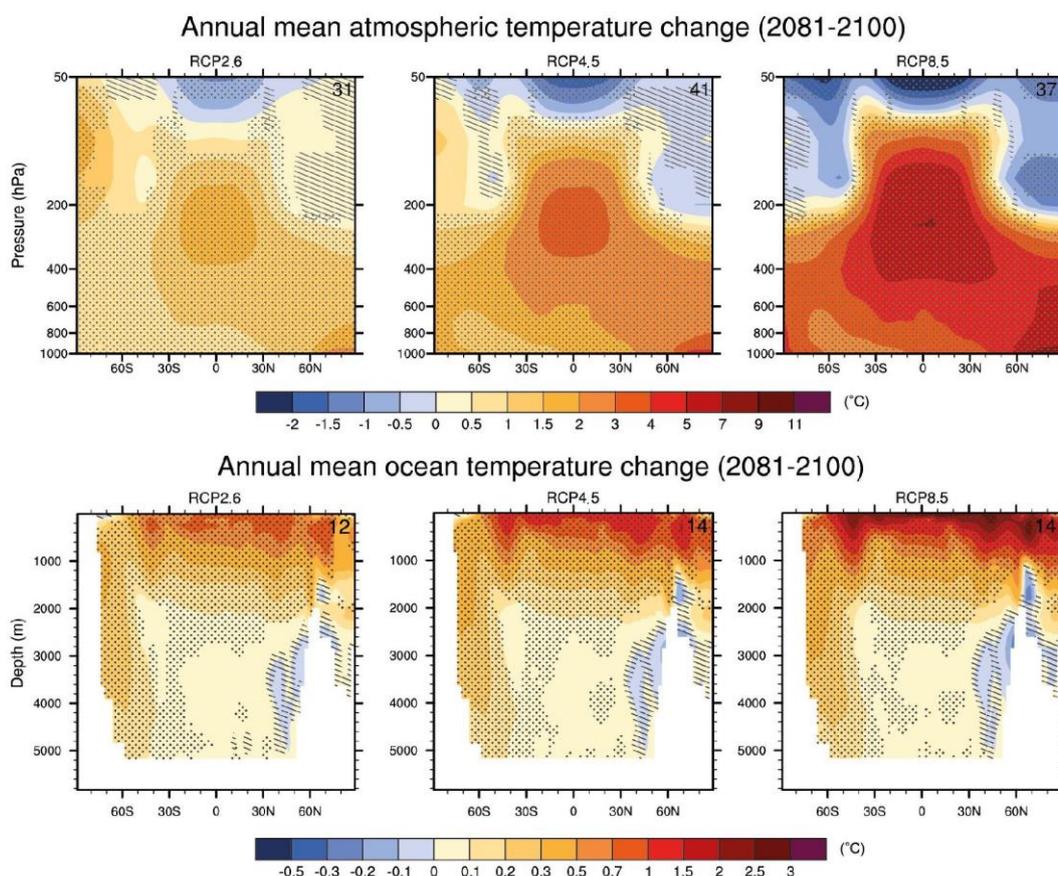
Fabio Raicich[1], Cosimo Solidoro[2], Stefano Salon[2]
[1]CNR- ISMAR U.O.S. di Trieste
[2]OGS

Le condizioni del mare del FVG sono solo parzialmente influenzate dalle condizioni atmosferiche locali, mentre una significativa parte della loro variabilità risente, a seconda delle scale temporali, della circolazione dell'Adriatico, del Mediterraneo e dell'Oceano Atlantico.

Le proiezioni sulla possibile evoluzione futura della temperatura e della salinità provengono principalmente da studi a scala mediterranea, mentre le proiezioni relative al livello medio provengono da studi alla scala globale, benché in qualche caso alcune componenti siano studiate anche a scala mediterranea. Si tratta di lavori realizzati in epoche diverse e con modelli diversi, quindi non sempre omogenei tra loro. Va sottolineato che alle proiezioni sono associate delle incertezze, spesso non trascurabili, intrinsecamente dovute al fatto che i modelli, per quanto avanzati, possono soltanto approssimare la realtà. Inoltre, essendo i modelli utilizzati costruititi per descrivere andamenti generali su scale spaziali di bacino, essi non sempre sono in grado di considerare processi o fenomeni locali.

Temperatura, salinità e altre variabili oceanografiche

In conseguenza del riscaldamento dell'atmosfera, le proiezioni globali in tutti gli scenari indicano un riscaldamento superficiale dell'oceano nel XXI secolo tra circa 1 e più di 3 °C, con massimi alle alte latitudini; il riscaldamento nei primi 1000 m è stimato tra 0.5 e 1.5 °C (fig. 1.2.15). La salinità superficiale è prevista in aumento alle latitudini tropicali e subtropicali e una diminuzione alle alte latitudini (Collins et al., 2013). Sulla scala mediterranea, tutti i modelli predicono per il XXI secolo un riscaldamento del mare e un aumento della salinità. Quest'ultimo fenomeno è il risultato dell'aumento del flusso netto d'acqua dal mare all'atmosfera, a causa di minore precipitazione e ridotto apporto fluviale in mare e dell'aumento dell'evaporazione, il tutto non compensato da significative variazioni del flusso attraverso lo Stretto di Gibilterra (Planton et al., 2012).

fig. 1.2.15– Variazioni medie annuali della temperatura dell'atmosfera (in alto) e dell'oceano (in basso) nel 2081-2100 rispetto al presente negli scenari RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 (da sinistra a destra). (Da: Collins et al. (2013), fig. 12.12, p. 1065.).

Somot et al. (2008), usando un modello regionale atmosferico-oceanico accoppiato, nello scenario SRES A2 trovano un aumento di temperatura superficiale del mare di 2.6 °C. Nello stesso scenario e periodo si ottengono aumenti di temperatura e salinità superficiali di 2.6 °C e 0.6, rispettivamente, e aumenti di temperatura di 1.08 °C nello strato 0-150 m e di salinità di 0.35 negli strati profondi (Planton et al., 2012). Ulteriori stime delle variazioni dal 1961-1990 al 2071-2100 provengono dal modello oceanico NEMOMED8 e quello atmosferico regionale ARPEGE-Climate e un ensemble di sei membri; negli scenari SRES B1, SRES A1B e SRES A2 la temperatura superficiale aumenta tra 1.73 e 2.97 °C e la salinità superficiale tra 0.70 e 0.89; le medie delle stesse variabili nello strato 0-150 m variano tra 1.29 e 2.23 °C e tra 0.60 e 0.74, rispettivamente (Adloff et al., 2015).

Il segnale del cambiamento è maggiore nell'Adriatico settentrionale, che subisce maggiore riscaldamento a causa della bassa profondità, e dove la salinità aumenta maggiormente per il previsto minore apporto fluviale. Somot et al. (2006), con un modello regionale non accoppiato, stimano per la fine del XXI secolo un aumento di temperatura superficiale dell'Adriatico di 3.5 °C e di salinità pari a 0.96, e aumenti medi su tutta la colonna d'acqua di 3.7 °C e 0.80, rispettivamente.

Nel corso di questo studio sono state compiute ulteriori simulazioni ed analisi, volte ad estrarre indicazioni sui cambiamenti attesi a livello delle acque marine del Friuli Venezia. Giulia. In particolare, si sono analizzate le proiezioni fornite per questa zona da tre diverse simulazioni: una ottenuta con il modello oceanografico già utilizzato da Lazzari et al. (2014) che descrive l'evoluzione fino al 2050 sotto lo scenario climatico RCP8.5, una che con lo stesso modello copre lo stesso periodo ma con lo scenario climatico RCP4.5, e una terza effettuata con il modello

già utilizzato in Somot et al. (2006) per i prossimi 100 anni sotto lo scenario climatico SRES A2 (fig. 1.2.16). La combinazione delle tre proiezioni permette di apprezzare sia la coerenza sia la dispersione fra le stesse, fornendo quindi una stima sia dell'evoluzione più probabile sia dell'incertezza rispetto ad essa.

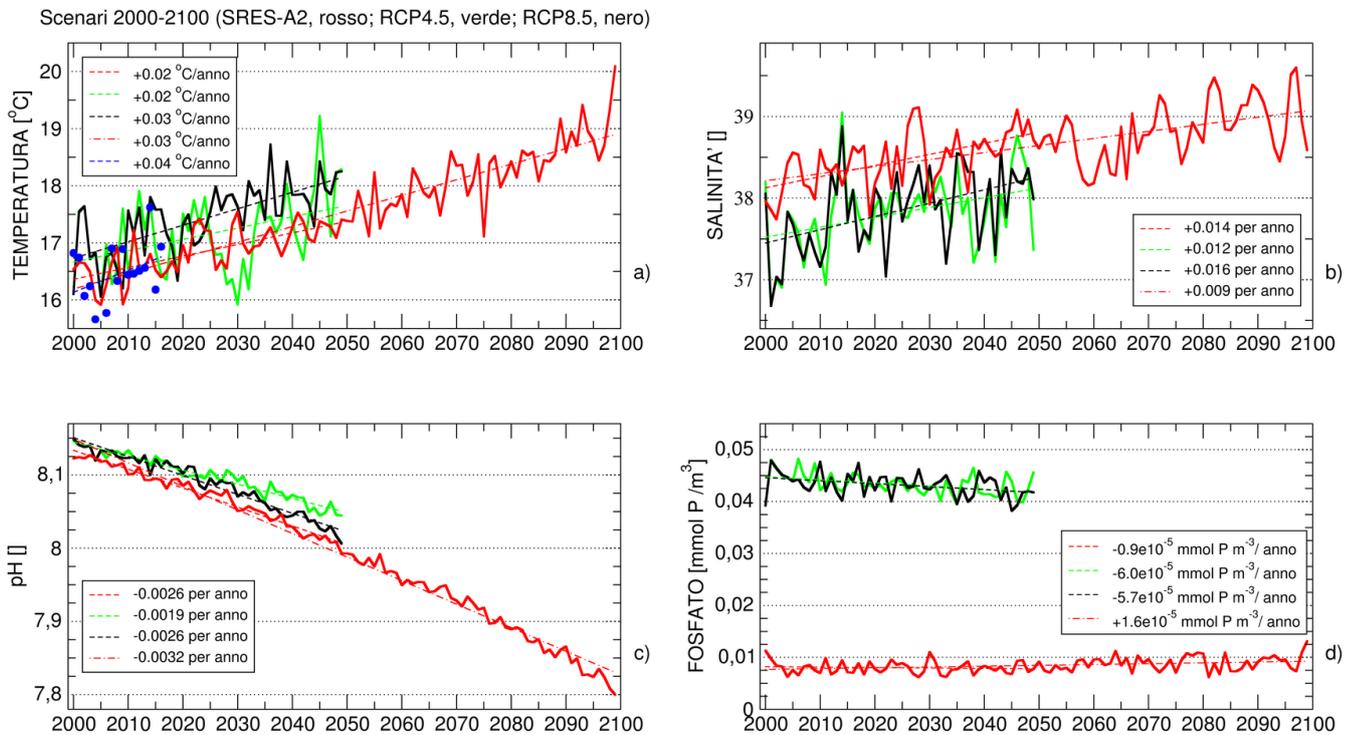
L'analisi delle simulazioni conferma che, anche per il FVG, si prevede un aumento di temperatura tra 0.2 e 0.3 °C per decade (fig. 1.2.16a), in funzione dello scenario climatico considerato.

Parallelamente, si osserva anche che tutte le simulazioni prevedono un aumento a lungo termine della salinità, con incrementi che vanno da circa 0.1 a 0.15 per decade (fig. 1.2.16b). In questo caso va rilevato come le simulazioni RCP siano prodotte con configurazioni del modello che riproducono gli scarichi fluviali con un maggiore dettaglio, e sono quindi da considerarsi potenzialmente più affidabili per questo specifico parametro.

Le simulazioni citate permettono di derivare anche proiezioni sugli andamenti decadali per altre variabili, quali il pH, che misura l'acidità marina, e l'andamento dei macronutrienti, in particolare il fosforo reattivo.

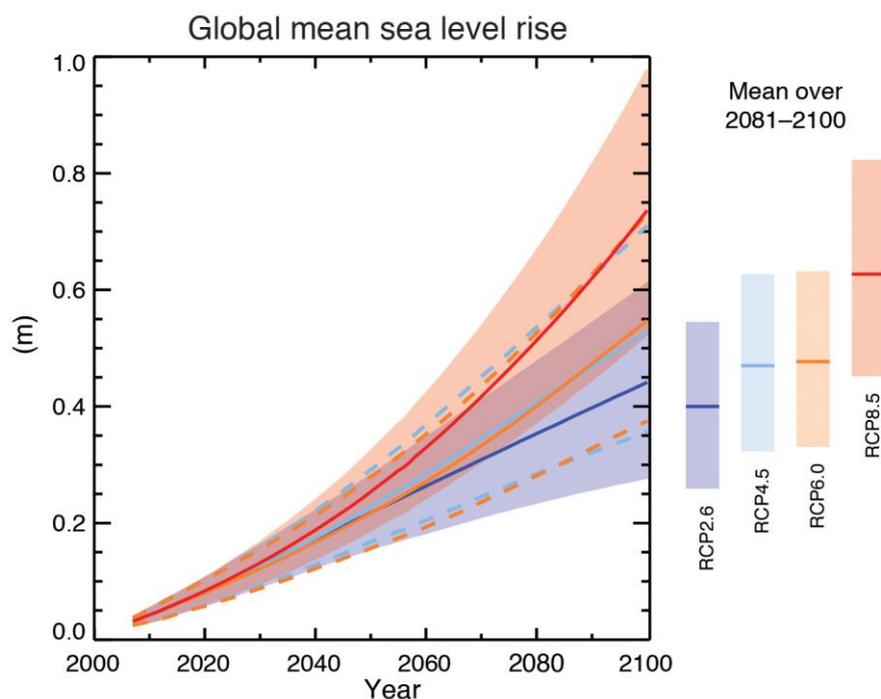
Per quanto riguarda il pH, tutte le proiezioni indicano una sua diminuzione, ossia un aumento dell'acidità dell'acqua marina, in linea con il fenomeno globalmente noto come "acidificazione oceanica" (fig. 1.2.16c). Anche questo processo, come il riscaldamento marino, è riconducibile all'incremento su scala globale della concentrazione dell'anidride carbonica (CO_2) atmosferica, che causa una maggiore dissoluzione di questo gas in acqua, con conseguente formazione di acido carbonico e riduzione del pH. Questo processo nelle ultime due decadi è stato oggetto di numerosi studi e progetti di ricerca internazionali in tutto il mondo, poiché si ritiene che esso sia in grado di influenzare sia direttamente sia indirettamente la sopravvivenza di alcuni organismi marini, con particolare riferimento a quelli dotati di strutture carbonatiche, e, più in generale, il funzionamento degli ecosistemi marini. A titolo di esempio si ritiene che l'acidificazione marina potrebbe influenzare gli impianti di acquacoltura, con particolare riferimento ai bivalvi, la pesca dei bivalvi, la struttura ed il funzionamento degli agglomerati sottomarini di tipo coralligeno, ma anche forse la sopravvivenza ed il reclutamento di altre specie. La diminuzione prevista per il Friuli Venezia Giulia è pari a 0.2–0.3 unità di pH in 100 anni, valore in linea con la letteratura mondiale e corrispondente a un aumento di 1.5-2 volte della concentrazione di ioni idrogeno.

Per quanto riguarda la concentrazione di macronutrienti in acqua (fig. 1.2.16d), parametro direttamente correlabile alla trofia potenziale del corpo d'acqua, va sottolineato come le proiezioni sugli andamenti decadali di questi composti dipendano non tanto, o solo, dagli scenari climatici considerati, ma soprattutto dall'entità degli scarichi fluviali e terricoli in generale, e quindi dagli scenari socioeconomici di uso del suolo e messa in opera di strategie di depurazione dei reflui terrestri. Infatti, ad un aumento dell'uso di fertilizzanti in agricoltura, del numero di abitanti delle città, ad una minore efficienza degli impianti di depurazioni corrisponde uno scarico maggiore, e quindi valori potenzialmente più alti di fosforo. È per questo che gli scenari socioeconomici correntemente utilizzati nei paesi più attenti a politiche di sviluppo e gestione del territorio più rispettose dell'ambiente tendono a considerare una diminuzione degli scarichi. Le simulazione analizzate utilizzano uno scenario di uso del territorio di questo tipo (denominato '*deep blue*', Lazzari et a. 2014) in linea con le migliori previsioni utilizzate in recenti progetti europei (Perseus, www.perseus-net.eu ; Medsea, www.medsea-project.eu; Coconet, www.coconet.eu) per la costa nord del Mediterraneo. Sotto queste condizioni, i diversi scenari di clima indicano tutti una sostanziale stabilità per la concentrazione di fosforo. Si noti come anche in questo caso i due modelli basati su scenari RCP, che descrivono con più dettaglio gli scarichi fluviali, forniscano stime diverse, e potenzialmente più accurate, di quella prodotta secondo lo scenario SRES A2.

fig. 1.2.16 – Proiezioni relative alle acque del Friuli Venezia Giulia per temperatura (a), salinità (b), pH (c) e fosfato (d), negli scenari SRES A2, RCP4.5 e RCP8.5. In (a) i punti blu corrispondono alle medie annuali osservate a Trieste (fig. 1.1.20).

Livello medio del mare ed eventi estremi

Complessivamente, i modelli prevedono un aumento del livello medio del Mediterraneo, come risultato dell'aumento della componente termosterica, cioè un aumento di volume a causa del riscaldamento della massa d'acqua, solo parzialmente compensato dalla diminuzione della componente alosterica, che si verifica per l'aumento di salinità legato al cambiamento del bilancio idrologico (Gomis et al., 2012). Per gli eventi estremi, ossia gli *storm surges*, sono disponibili studi specifici per il nord Adriatico, da cui risulta che nel XXI secolo il forzante meteorologico dovrebbe essere tendenzialmente meno favorevole al loro verificarsi.

Le variazioni previste del livello medio globale sono riassunte in Church et al. (2013). A seconda degli scenari riportati, cioè SRES A1B, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5, rispetto al periodo 1986-2005, sono riportati aumenti di 27, 24, 26, 25 e 30 cm nel 2046-2065, con incertezze di ±7-8 cm, e di 52, 40, 47, 48 e 63 cm nel 2081-2100, con incertezze tra ±14-15 cm e ±18-19 cm, rispettivamente (fig. 1.2.17).

fig. 1.2.17 – Variazioni del livello medio del mare nel XXI secolo rispetto al presente negli scenari RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5. Fonte Stocker et al. (2013), fig. TS.22, p. 100.

Carillo et al. (2012) hanno studiato la componente sterica (termosterica più alosterica) del livello marino del Mediterraneo mediante un modello regionale accoppiato; la componente atmosferica è RegCM, quella oceanica è MITgcm, le condizioni al contorno sono tratte dall'accoppiamento dei modelli globali ECHAM5 (atmosfera) e MIPOM (oceano). Nello scenario SRES A1B la variazione della componente sterica nel 2001-2050 rispetto al 1951-2000, mediata sull'intero Mediterraneo, risulta tra 2 e 7 cm, a seconda di differenti condizioni al contorno a Gibilterra.

Jordà et al. (2012) si sono occupati del contributo atmosferico negli scenari SRES B1, SRES A1B e SRES A2 mediante il modello oceanico HAMSOM forzato da quello atmosferico ARPEGE-Climate. A scala di bacino, nel periodo 2001-2100 l'effetto della meteorologia risulta in un *trend* negativo appena significativo nello scenario SRES B2, di –0.16 mm/a (Mediterraneo occidentale) e –0.17 mm/a (orientale) nel SRES A1B, e –0.22 mm/a (occidentale) e –0.25 mm/a (orientale) nello scenario SRES A2. Si riscontrano tuttavia differenze regionali e stagionali. In particolare, per l'Adriatico, i *trends* non sono significativi in estate in tutti gli scenari, mentre, in inverno, il *trend* è approssimativamente –0.5 mm/a (SRES B1), –0.6 mm/a (SRES A1B) e –0.8 mm/a (SRES A2); la tendenza alla diminuzione è soprattutto dovuta al previsto aumento della pressione atmosferica nell'area mediterranea.

Vari studi riguardano gli eventi estremi nel nord Adriatico, specialmente del loro impatto su Venezia. Confrontando il periodo 2071-2100 con il 1961-1990, Lionello et al. (2012a) stimano che la frequenza degli *storm surges* estremi non subisce variazioni significative nello scenario SRES B2, tranne un leggero aumento degli eventi più intesi, e diminuisce fino al 40% nel caso degli eventi più intensi nello scenario SRES A2; viene usato il modello oceanico HYPSE forzato da quello atmosferico RegCM. Troccoli et al. (2012) stimano un calo del 30% della frequenza di *storm surges* estremi dalla fine del XX secolo alla fine del XXI nello scenario SRES A1B, usando il forzante atmosferico dei modelli ECHAM5, HadGEM e HiGEM e un modello per l'individuazione degli eventi attraverso le caratteristiche della circolazione atmosferica. L'approccio al problema seguito da Conte e Lionello (2013), mediante il modello HYPSE

forzato da sette modelli atmosferici impiegati nel progetto PRUDENCE, nello scenario SRES A1B mostra una riduzione dell'ampiezza degli *storm surges* nel nord Adriatico nell'ordine del 5 % tra il 1971-2000 e il 2021-2050. Mel et al. (2013), con il modello HYPSE forzato dal modello atmosferico EC-Earth, riportano che, nello scenario RCP4.5, non ci sono significative variazioni della frequenza degli *storm surges* tra il 2004-2008 e il 2094-2098. Vousdoukas et al. (2016), con il modello di *storm surge* Delft3D forzato da sei modelli atmosferici, stimano un leggero aumento nell'altezza degli *storm surges* nell'Adriatico tra il 1970-2000 e il 2070-2100, usando un ensemble di 8 membri nello scenario RCP8.5; nessuna variazione significativa è riscontrata nello scenario RCP4.5.

Conclusioni

Possiamo ora trarre le principali conclusioni dall'analisi delle proiezioni climatiche per il XXI secolo nel FVG. Queste proiezioni mostrano che per lo scenario "*business as usual*" (RCP8.5), il FVG potrebbe subire un aumento di temperatura per la fine del XXI secolo fino a 5°C in inverno e fino a 6°C in estate, con un forte aumento di stress termico associato ad ondate di calore e numero di giorni e notti calde. Secondo le indicazioni dei modelli, la precipitazione dovrebbe generalmente aumentare in inverno, con un corrispondente aumento di eventi piovosi molto intensi, e diminuire anche fortemente in estate, quindi con un inaridimento estivo della regione. Come conseguenza del riscaldamento atmosferico la temperatura del mare del FVG è destinata ad aumentare fino a 3°C a fine secolo. La maggiore evaporazione per riscaldamento e il minore apporto di acqua dalle precipitazioni e dai fiumi comporta un aumento di salinità di circa 1. Il pH del mare è previsto in diminuzione fino a 0.3, corrispondente a un aumento dell'acidità, con significative conseguenze sull'ecosistema. Il livello marino medio a fine secolo dovrebbe essere oltre mezzo metro più alto. Non si dovrebbero verificare significativi cambiamenti della frequenza e intensità degli eventi estremi (acque alte), ma il loro impatto sulle aree costiere sarà amplificato dall'aumentato livello medio. La criosfera del FVG, già estremamente ridotta nel corso dell'ultimo secolo (-82% in superficie, -96% in volume) è verosimilmente destinata a contrarsi ulteriormente e rapidamente in tutti gli scenari. Gli scenari RCP4.6 e RCP8.5 ne preludono la probabile totale scomparsa prima di fine secolo con la ELA destinata a salire al di sopra dei 3400 m di quota. Nello scenario RCP2.6 sia il riscaldamento che i cambiamenti di precipitazione ed eventi estremi, nonché le conseguenze sul mare e sul suo livello, sono fortemente ridotti rispetto all'RCP8.5, mentre i risultati nello scenario RCP4.5 sono generalmente intermedi fra quelli dell'RCP2.6 ed RCP8.5.

Chiaramente i cambiamenti del clima del FVG nello scenario "*business as usual*" avrebbero forti ripercussioni su molti settori socioeconomici regionali, come le risorse idriche, l'agricoltura, i servizi ecosistemici, la salute, il turismo e così via, come verrà analizzato nei prossimi capitoli. La loro forte riduzione nello scenario RCP2.6, che è vicino a quello prospettato dall'accordo di Parigi, rinforza l'importanza di produrre il massimo sforzo per raggiungere gli obiettivi posti dall'accordo stesso.

1.3 STUDIO PRELIMINARE PER UNA CLASSIFICAZIONE BIOCLIMATICA DEL FRIULI VENEZIA GIULIA E SUA POSSIBILE VARIAZIONE FUTURA A SEGUITO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Andrea Cicogna[1], Valentina Gallina[2], Stefano Micheletti[1]
[1] ARPA-FVG – S.O.C. Osmer
[2] ICTP

Introduzione

L'analisi congiunta dei fattori che determinano il clima di una specifica regione (pioggia, temperatura, vento, ecc.), attraverso adeguati criteri di classificazione, consente di ridurre la grande variabilità climatica presente sul nostro pianeta a scale più facilmente utilizzabili. Per questo motivo nel tempo sono state proposte varie classificazioni climatiche, spesso utili per campi di applicazione molto specifici. Ricordiamo ad esempio indici come quello idrometrico di Amman, che classifica il clima in funzione dell'influenza del mare (De Philippis A 1937). Tra gli indici di aridità ricordiamo quello di de Martonne (1926) o l'UNEP, indice ufficiale per l'ONU, o ancora il Bagnouls-Gaussen (1957). L'indice di Lang classifica il clima in funzione della formazione di humus nel terreno (Pinna, 1977). Molto utilizzati sono poi gli indici che discriminano i climi in funzione della distribuzione geografica delle associazioni vegetali.

Il clima infatti esercita un ruolo dominante sulla distribuzione dei principali tipi di vegetazione naturali. Ad esempio in Italia, a partire dalle zone più calde e spostandosi verso le più fredde, si assiste al passaggio di fasce di vegetazione che vanno dai boschi sempreverdi mediterranei, a quelli temperati caducifogli, fino a quelli dominati da conifere microterme (Bernetti, 2007).

Le classificazioni bioclimatiche di questo genere proposte dalla letteratura sono numerose: si passa dai lavori pioneristici di Heinrich Mayr del 1906 fino alla più recente Worldwide Bioclimat Classification proposta da Rivas Martinez alla fine del secolo scorso, variamente sperimentata anche in Italia (Pesaresi *et al.*, 2014).

In questo lavoro tratteremo la classificazione climatica del Friuli Venezia Giulia secondo due indici bioclimatici: Köppen (1936) e Pavari (De Philippis, 1937). IL territorio regionale verrà classificato in base a dati climatici registrati nel passato (1961-2010), parallelamente andremo ad indagare come questa classificazione potrà variare nel prossimo futuro in funzione dei cambiamenti climatici in atto.

La letteratura già riporta lavori di questo tipo, ricordiamo ad esempio la pubblicazione di Pignatti del 2011, ma con dettaglio territoriale in genere non sufficiente per una classificazione a livello regionale.

Materiali e metodi

Fonte dei dati

I dati storici su cui si basano le elaborazioni e le mappe qui riportate sono stati raccolti dalle seguenti tipologie di stazioni di misura:

- meteorologiche sinottiche, attivate dall'ERSA tra il 1990 e il 1997 ed ora confluite nella rete meteorologica della Regione Friuli Venezia Giulia, per il periodo dall'attivazione ad oggi;
- termo-pluviometriche e pluviometriche del Servizio Idrografico dello Stato, di cui sono stati utilizzati i dati dal 1961 ad oggi, ed ora confluite nella rete meteorologica della Regione Friuli Venezia Giulia;
- pluviometriche di regioni contermini, per il periodo 1961-2015.

Per gli scenari climatici futuri si fa riferimento all'ensemble di 5 modelli per i periodi 2021-2050 e 2070-2099, secondo gli scenari emissivi RCP 2.6 e RCP 8.5 (confronta 1.2. Il data set: struttura e utilizzo)

Modalità di elaborazione

L'interpolazione dei dati storici è stata effettuata su una griglia regolare di passo 500 x 500 m che si estende dalle coordinate 2313000E,5048000N alle 2435500E,5169000N (Gauss-Boaga - fuso EST). Dei possibili 59290 teorici punti della griglia (242N x 245E), ne sono stati elaborati solo i 31504 che risultano contenuti all' interno dei confini amministrativi della Regione.

Per quanto riguarda la temperatura, l'interpolazione spaziale dei dati tiene conto della quota, della distanza dal mare, dell'eventuale presenza di una valle e dell'esposizione. I dati pluviometrici sono stati interpolati utilizzando algoritmi di Kriging (Wackernagel, 1998).

Per il calcolo delle mappe termiche relative agli scenari futuri è stato calcolato lo scarto medio nel dominio tra le temperature (mensili e annuali) derivanti dall'ensemble dei 5 modelli climatici prescelti nel periodo 1991-2005 versus i periodi 2021-2050 e 2070-2099 (tab. 1.3.1).

Similmente è stato calcolato il rapporto medio nel dominio tra le piogge (mensili e annuali) derivanti dall'ensemble dei 5 modelli climatici prescelti nel periodo 1976-2005 versus i periodi 2021-2050 e 2070-2099 (tab. 1.3.2).

A partire dai grigliati medi mensili e annuali ricavati dai dati storici delle stazioni della rete meteorologica regionale (1991-2005 per la temperatura e 1976-2005 per la pioggia), i *bias* e i rapporti determinati sono stati utilizzati quali parametri di correzione per creare dei nuovi grigliati di dimensione identica a quelli storici e che rappresentano l'andamento termopluviometrico medio mensile e annuale per i periodi 2021-2050 e 2070-2099 nei due scenari emissivi considerati.

Questo tipo di approccio non tiene conto delle diverse variazioni che possono presentare le diverse zone del territorio in funzione degli intervalli temporali indagati e degli scenari emissivi. Infine, per il calcolo degli indici di Köppen e Pavari, che si basano su dati termopluviometrici, sono state sviluppate opportune routine in Visual Basic. La valutazione della siccità estiva è stata effettuata con l'indice di Bagnoulss - Gaussen

tab. 1.3.1 - Temperature medie (mensili ed annuali) derivanti dall' ensemble dei 5 modelli climatici prescelti nei periodi 1991-2005, 2021-2050 e 2070-2099 per i due scenari emissivi – Scarti (Bias) tra i valori del periodo storico e del futuro. Tutti i valori sono calcolati come media nell'intero dominio analizzato.

Periodo	variabile	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
1976-2005	Media	-1.4	-0.8	2.3	6.7	11.2	15.0	17.7	17.0	13.1	8.5	3.7	-0.4	7.7
2021-2050	Media	-1.1	-0.3	2.9	7.3	11.7	15.7	18.7	18.3	14.2	9.5	4.5	0.2	8.5
scenario emissivo RPC 2.6	Bias	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	1.0	1.2	1.1	1.0	0.8	0.6	0.8
2070-2099	Media	-0.9	0.3	3.5	7.4	11.6	15.8	18.5	17.9	14.2	9.5	4.4	0.3	8.5
scenario emissivo RPC 2.6	Bias	0.5	1.1	1.3	0.8	0.4	0.8	0.8	0.8	1.1	1.0	0.7	0.7	0.8
2021-2050	Media	-0.6	0.7	3.6	7.6	11.9	16.2	19.0	18.5	14.7	10.1	4.8	0.8	8.9
scenario emissivo RPC 8.5	Bias	0.8	1.5	1.3	0.9	0.8	1.2	1.3	1.5	1.6	1.6	1.1	1.2	1.2
2070-2099	Media	2.3	3.0	5.8	10.0	14.3	18.8	22.1	21.9	17.8	12.5	7.4	3.5	11.6
scenario emissivo RPC 8.5	Bias	3.8	3.8	3.5	3.3	3.1	3.8	4.4	4.8	4.7	4.0	3.6	3.9	3.9

tab. 1.3.2 - Precipitazioni medie (mensili e annuali) derivanti dall'ensemble dei 5 modelli climatici prescelti nei periodi 1991-2005, 2021-2050 e 2070-2099 – Rapporti tra i valori del periodo storico e quelli degli scenari futuri. Tutti i valori sono calcolati come media nell'intero dominio analizzato.

Periodo	variabile	gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	anno
1976-2005	media	102	97	109	125	137	125	106	111	117	152	140	126	1447
2021-2050	media	113	100	113	131	158	129	104	103	141	153	149	106	1502
scenario emissivo RPC 2.6	rapporto	1.11	1.04	1.03	1.05	1.16	1.04	0.98	0.93	1.20	1.01	1.06	0.84	1.04
2070-2099	media	128	110	120	151	160	127	109	109	122	165	141	110	1553
scenario emissivo RPC 2.6	rapporto	1.26	1.14	1.10	1.20	1.16	1.02	1.03	0.98	1.04	1.08	1.01	0.88	1.07
2021-2050	media	97	98	125	132	154	126	102	108	132	161	139	119	1491
scenario emissivo RPC 8.5	rapporto	0.95	1.01	1.14	1.05	1.12	1.01	0.96	0.97	1.13	1.06	0.99	0.94	1.03
2070-2099	media	141	104	126	129	148	107	78	87	107	161	158	126	1470
scenario emissivo RPC 8.5	rapporto	1.38	1.08	1.15	1.03	1.08	0.86	0.74	0.78	0.91	1.05	1.13	1.00	1.02

Risultati

L'indice di Köppen: classificazione attuale del territorio e possibili variazioni future

Questo indice venne proposto per la prima volta nel 1918 da Wladimir Köppen e successivamente perfezionato sino alla sua edizione definitiva del 1936. Questa classificazione identifica 5 grandi gruppi climatici che caratterizzano il clima dell'intero globo terrestre.

L'inquadramento del Friuli Venezia Giulia attraverso la classificazione di Köppen consente quindi di confrontare il clima della regione con il resto del mondo.

Utilizzando i dati climatici dal 1961 al 2010, la classificazione della regione con tale indice ci restituisce un territorio dove, partendo dall'Adriatico e muovendosi a nord verso le montagne, si incontrano climi via via più freddi (fig. 1.3.3.A).

Quasi tutta la regione (il 90% del territorio- tab. 1.3.3) è caratterizzata da climi mesotermi C (Climi temperati delle medie latitudini) dove il mese più freddo ha una temperatura media inferiore a 18 °C ma superiore a -3 °C e dove almeno in un mese si ha una temperatura media superiore a 10 °C.

Le piogge risultano abbondanti in ogni mese dell'anno (sottoclima umido f), per cui in funzione della temperatura estiva distinguiamo i seguenti sottoclimi:

- Cfa: Con estate molto calda; il mese più caldo ha una temperatura media superiore a 22 °C.
- Cfb: Con estate calda; il mese più caldo ha una temperatura media inferiore a 22 °C ma si contano almeno 4 mesi con temperatura media al di sopra di 10°C.
- Cfc: Con estate fresca e breve; meno di 4 mesi e temperatura media al di sopra di 10°C.

Nelle zone di maggior quota della regione, sulle Alpi Giulie e Carniche, si incontrano i climi microtermi delle medie latitudini Dfb e soprattutto Dfc dove il mese più freddo ha una temperatura inferiore a -3 °C e la temperatura media del mese più caldo è superiore a 10 °C, l'estate è fresca e breve e si contano meno di 4 mesi con temperatura media al di sopra di 10 °C.

Sulle vette, dove la temperatura del mese più caldo è inferiore ai 10 °C, incontriamo il clima semi-nivale di montagna (ETH).

Dal punto di vista delle superfici si può notare come circa il 10% della superfice regionale afferisca ai climi microtermi, che sono quelli tipici delle conifere (tab 1.3.3).

Le figure 1.3.1B e 1.3.1C ci restituiscono la classificazione di Köppen nello scenario emissivo RCP 2.6 per i trentenni futuri 2021-2050 e 2070-2099. Si nota come rispetto alla mappa storica (fig. 1.3.1A) si abbia una diminuzione delle zone in cui è presente il clima Cfb a favore del più caldo Cfa.

Nella tab 1.3.3 si può quantificare come, in termini percentuali, la superficie del Cfa passi da circa il 42 al 53-55 %. Meno evidente risulta la diminuzione percentuale dei climi microtermi (DFb e DFc) mentre si assiste alla quasi scomparsa delle superfici classificate come clima semi-nivale montano (ETH). È interessante notare come non vi sia una variazione significativa delle superfici tra i due trentenni futuri analizzati, ad indicare come nello scenario emissivo in esame (RCP 2.6) si assista ad una sostanziale costanza delle condizioni climatiche future.

Similmente le figure 1.3.1D e 1.3.1E ci restituiscono la classificazione di Köppen nello scenario emissivo RCP 8.5 per i trentenni futuri 2021-2050 e 2070-2099. Rispetto alla mappa storica (fig. 1.3.1.A), si ha una forte differenziazione nelle variazioni previste per il primo e il secondo trentennio.

Mentre nel periodo 2021-2050 la variazione nella classificazione delle superficie regionali è molto simile a quanto previsto per lo scenario emissivo RCP 2.6, nel trentennio 2070-2099 il panorama bioclimatico regionale appare profondamente mutato. Infatti, nel secondo trentennio i climi microtermi, e tanto più quello seminivale montano, quasi spariscono nella classificazione. Aumenta in modo notevolissimo la superficie territoriale dove è presente il sottoclima caldo Cfa che passa dal 41 al 73 % e di converso il Cfb passa dal 44 % al 26 %. Contrariamente allo scenario RCP 2.6, la variazione verso climi più caldi tra primo e secondo trentennio risulta molto marcata.

tab. 1.3.3 - Distribuzione della superficie del Friuli Venezia Giulia secondo la classificazione di Köppen nel periodo storico 1961-2010 e nei trentenni futuri 2021-2050, 2070-2099 secondo le ipotesi di variazione termopluviometrica del territorio nei 2 scenari emissivi RCP 2.6 e RCP8.5 derivanti dall'ensemble dei 5 modelli predittivi climatici prescelti.

Climi	Sottoclimi	dati storici		scenario emissivo RCP 2.6				scenario emissivo RCP 8.5			
		1961-2010		2021-2050		2070-2099		2021-2050		2070-2099	
		Km^2	%	Km^2	%	Km^2	%	Km^2	%	Km^2	%
Montani	ETH	93	1.2	22	0.3	34	0.4	17	0.2	0	0.0
Microtermi	Dfc	730	9.3	608	7.8	597	7.6	506	6.4	23	0.3
	Dfb	45	0.6	85	1.1	11	0.1	46	0.6	0	0.0
Macrotermi	Cfc	243	3.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	20	0.3
	Cfb	3484	44.4	2848	36.3	3074	39.2	2920	37.2	2056	26.2
	Cfa	3249	41.4	4281	54.6	4129	52.6	4356	55.5	5745	73.2

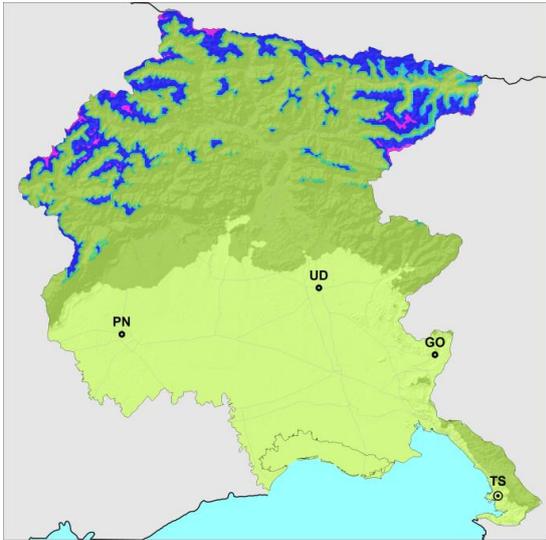



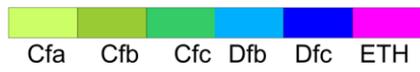
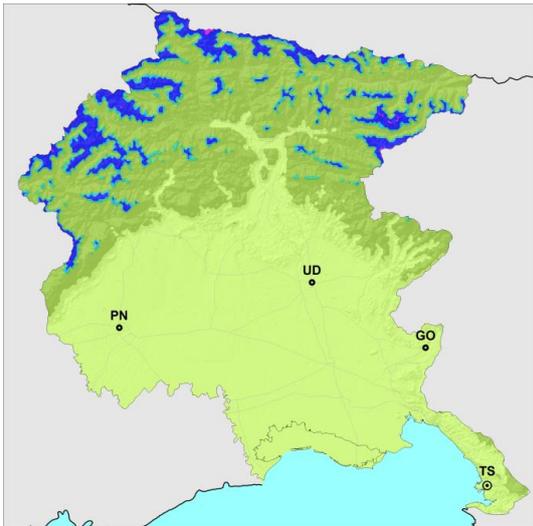
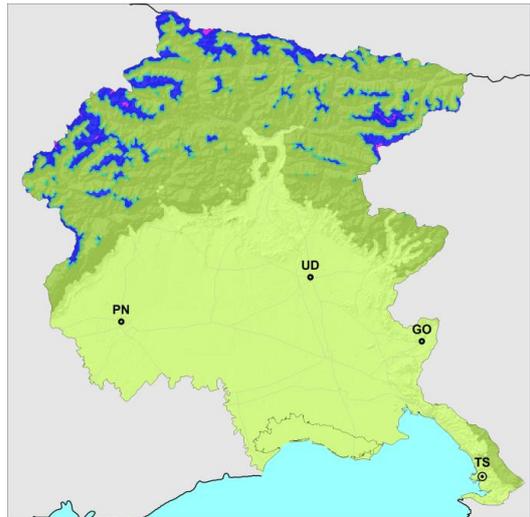
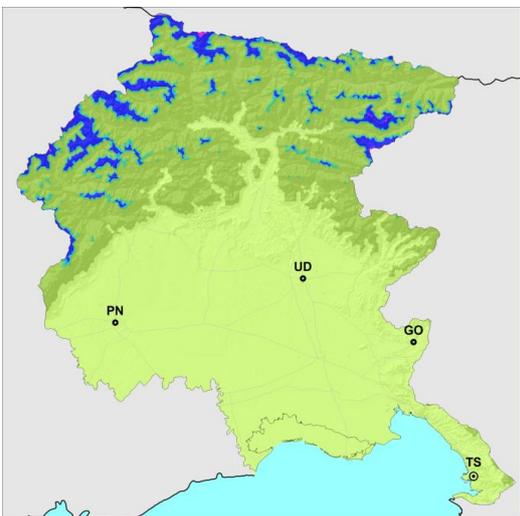
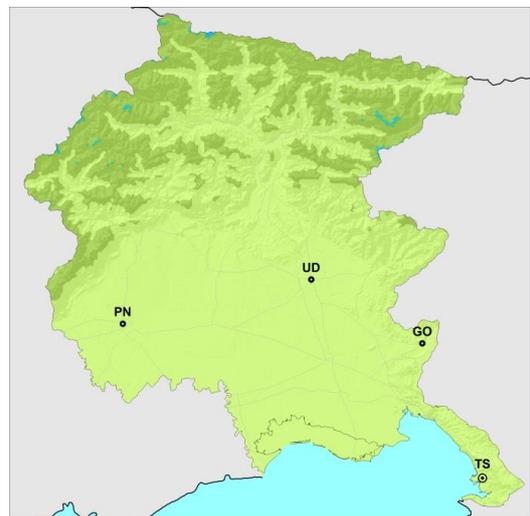
Fig. 1.3.1 - Classificazione bioclimatica del Friuli Venezia Giulia secondo la classificazione di Köppen.

A – Dati medi climatici 1961-2010;

B- Periodo 2021-2050 scenario emissivo RCP 2.6;

C- Periodo 2070-2099 scenario emissivo RCP 2.6;

D- Periodo 2021-2050 scenario emissivo RCP 8.5;

E- Periodo 2070-2099 scenario emissivo RCP 8.5

Indice di Pavari: classificazione attuale del territorio e possibili variazioni future

L'indice elaborato da Aldo Pavari nel 1916 adattando al contesto italiano lo schema proposto da Heinrich Mayr (1906) e integrato da Alessandro De Philippis nel 1937, risulta ancora uno dei più utilizzati a livello nazionale. Questa classificazione fitoclimatica suddivide il territorio italiano in 5 zone, ciascuna associata al nome di una specie vegetale rappresentativa. Il presupposto su cui si basa la suddivisione del territorio in zone fitoclimatiche è l'analogia fra associazioni vegetali simili dislocate in aree geografiche differenti per altitudine e latitudine, ma analoghe per quanto riguarda il regime termico e pluviometrico.

La classificazione usa come parametri climatici di riferimento le temperature medie dell'anno, del mese più caldo, del mese più freddo e le medie dei minimi. Ogni zona si suddivide in più tipi e sottozone in base alla temperatura e, per alcune zone, alla piovosità (tab. 1.3.4).

tab. 1.3.4 - Classificazione fitoclimatica Pavari.

Zona fitoclimatica	Sottozona	Connotazione in funzione della piovosità	Temperatura media			
			Annua	Mese più caldo	Mese più freddo	Media dei minimi
Alpinetum			anche minore di -2 °C	minore di -20 °C	maggiore di 10 °C	anche minore di -40 °C
Picetum	Fredda		3-6 °C	anche minore di -6 °C	maggiore di 15 °C	anche minore di -30 °C
	Calda		3-6 °C	maggiore di -6 °C		maggiore di -30 °C
Fagetum	Fredda		6-12 °C	maggiore di -4 °C		maggiore di -25 °C
	Calda		7-12 °C	maggiore di -2 °C		maggiore di -20 °C
Castanetum	Fredda	Umida (piogge annue < 700 mm)	10-15 °C	maggiore di -1 °C		maggiore di -15 °C
		Secca (piogge annue > 700 mm)				
	Calda	con siccità estiva	10-15 °C	maggiore di 0 °C		maggiore di -12 °C
		senza siccità estiva				
Lauretum	Fredda	senza siccità estiva	12-17 °C	maggiore di 3 °C		maggiore di -9 °C
		con siccità estiva				
	Media	senza siccità estiva	14-18 °C	maggiore di 5 °C		maggiore di -7 °C
		con siccità estiva				
Lauretum	Calda	senza siccità estiva	15-23 °C	maggiore di 7 °C		maggiore di -4 °C
		con siccità estiva				

In Friuli Venezia Giulia si ritrovano tutte le 5 zone principali proposte da Pavari, ma non tutte le sottozone. In effetti, il clima del passato ci restituisce un territorio dove i climi secchi non sono presenti. Non sono presenti altresì le zone più calde del *Lauretum* (fig 1.3.2A).

Si può notare come oltre la metà del territorio regionale rientri nella zona *Castanetum* caldo umido (tab. 1.3.5), intorno al 22 % del territorio nella zona delle faggete (*Fagetum*) e il 13% nella zona delle abetaie (*Picetum*).

tab. 1.3.5- Distribuzione della superficie del Friuli Venezia Giulia secondo la classificazione di Pavari nel periodo storico 1961-2010 e nei trentenni futuri 2021-2050, 2070-2099 secondo le ipotesi di variazione termopluviometrica del territorio nei 2 scenari emissivi RCP 2.6 e RCP8.5 derivanti dall' ensemble dei 5 modelli predittivi climatici prescelti.

zona	Sotto zona	connotazione	dati storici		scenario emissivo RCP 2.6				scenario emissivo RCP 8.5			
			1961-2010		2021-2050		2070-2099		2021-2050		2070-2099	
			Km^2	%	Km^2	%	Km^2	%	Km^2	%	Km^2	%
Alpinetum			267	3.4	146	1.9	136	1.7	95	1.2	4	0.0
Picetum	Freddad		1031	13.	781	10.0	755	9.6	655	8.4	125	1.6
Fagetum	Fredda		132	1.7	268	3.4	196	2.5	238	3.0	0	0.0
Fagetum	Calda		1645	21.	1557	19.8	1630	20.8	1538	19.6	1145	14.6
Castanetumm	Calda	umida	4071	51.	1410	18.0	1206	15.4	1237	15.8	904	11.5
Lauretum	Fredda	senza siccità	443	5.7	3363	42.9	3599	45.9	3735	47.6	1077	13.7
Lauretum	Media	senza siccità	255	3.2	319	4.1	322	4.1	346	4.4	2266	28.9
Lauretum	Calda	senza siccità	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	1690	21.5
Lauretum	Media	con siccità	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	43	0.5
Lauretum	Calda	con siccità	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	591	7.5

La zona del *Lauretum* freddo e medio interessano le zone lagunari e la costa per una superfice di circa 3700 Km^2 pari al 9 % della superficie regionale; infine molto basse appaiono le zone territoriali classificate come *Alpinetum*.

Le figure 1.3.3.2.1B e 1.3.3.2.1C ci restituiscono la classificazione di Pavari nello scenario emissivo RCP 2.6 per i trentenni futuri 2021-2050 e 2070-2099. Si nota come rispetto alla mappa storica (Fig. 1.3.3.2.1A) si abbia una forte diminuzione delle zone in cui è presente il fitoclima *Castanetum* caldo umido sostituito dal *Lauretum* freddo. Nella tab.5 si può quantificare come in termini percentuali la superficie del *Castanetum* passi da circa il 50% al 16-18 % e, di converso, la superficie del *Lauretum* freddo passa dal 6% al 43-46 %. Si deve notare che le temperature medie della pianura friulana nel periodo di riferimento 1961-2010 si trovano poco al di sotto dei valori soglia rispetto al passaggio tra una classe e la successiva. Pertanto un effetto così macroscopico sulla variazione della classificazione della pianura regionale è frutto in realtà di una piccola variazione termica. Aggiungiamo che, limitando il periodo di indagine sui dati del passato al ventennio 1991-2010, si può già apprezzare come con questo riferimento più recente la superficie del *Lauretum* sia già molto estesa in pianura (dati non mostrati).

In questo scenario emissivo la variazione degli altri fitoclimi non risulta particolarmente evidente. Come già per la classificazione di Köppen anche per questa classificazione è interessante notare come non vi sia una variazione significativa delle superfici tra i due trentenni futuri, ad indicare come nello scenario emissivo in esame (RCP 2.6) vi sia una sostanziale costanza delle condizioni climatiche future.

Le figure 1.3.2D e 1.3.2E ci restituiscono la classificazione di Pavari nello scenario emissivo RCP 8.5 per i trentenni futuri 2021-2050 e 2070-2099. Rispetto alla mappa storica (Fig. 1.3.2A), si ha una forte differenziazione nelle variazioni previste per il primo e il secondo trentennio.

A

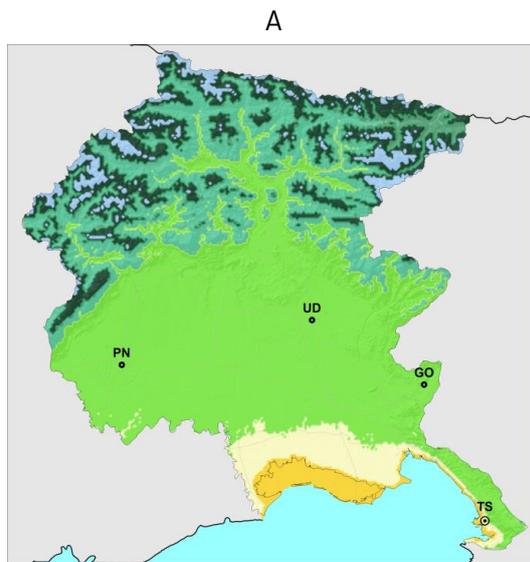



fig. 1.3.2 - Classificazione Fitoclimatica del Friuli Venezia Giulia secondo la classificazione di Pavari. A – Dati medi climatici 1961-2010; B- Periodo 2021-2050 scenario emissivo RCP 2.6; C- Periodo 2070-2099 scenario emissivo RCP 2.6; D- Periodo 2021-2050 scenario emissivo RCP 8.5; E- Periodo 2070-2099 scenario emissivo RCP 8.5

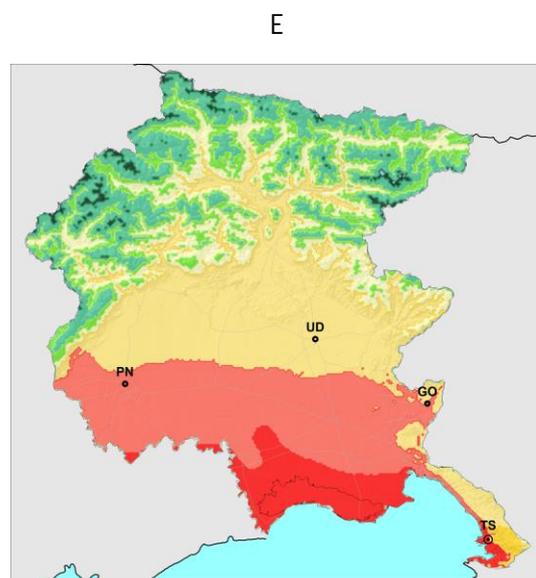
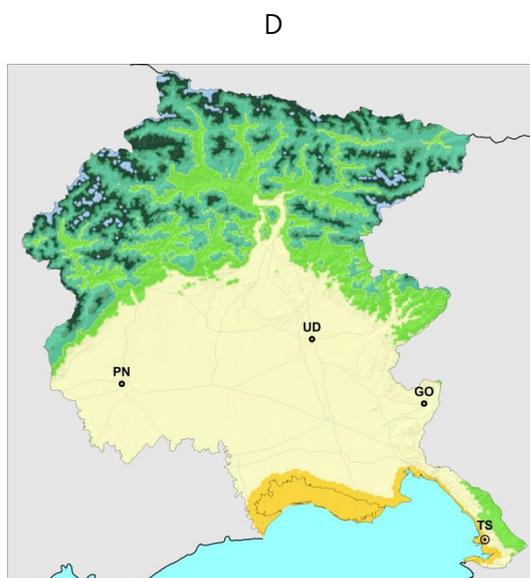
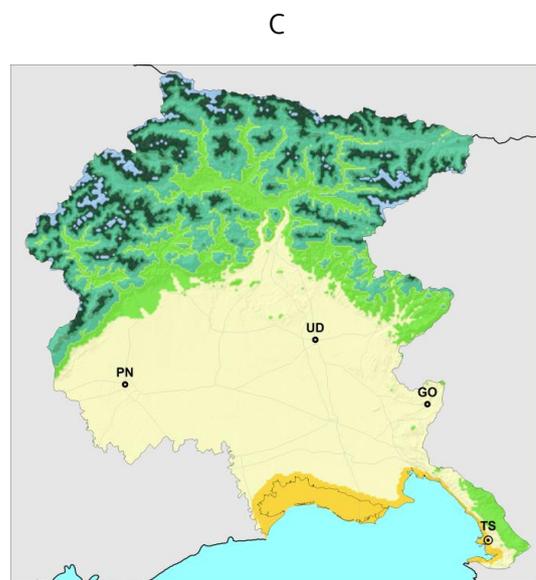
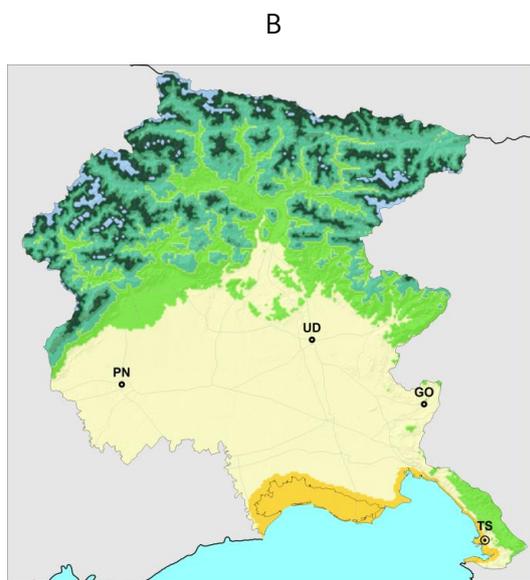
Legenda

alpinetum		
picetum	freddo	
fagetum	freddo	
fagetum	caldo	
castanetum	caldo	umido
castanetum	caldo	secco
lauretum	sottozona fredda	senza siccità estiva
lauretum	sottozona media	senza siccità estiva
lauretum	sottozona calda	senza siccità estiva
lauretum	sottozona media	con siccità estiva
lauretum	sottozona calda	con siccità estiva

B

C

D

E

Come già per Köppen, mentre nel periodo 2021-2050, la variazione nella classificazione delle superfici regionali è molto simile a quanto previsto per lo scenario emissivo RCP 2.6, nel trentennio 2070-2099 il panorama fitoclimatico regionale appare profondamente mutato.

Infatti, nel secondo trentennio le zone di *Lauretum* aumentano in modo sostanziale passando da un complessivo 9% del periodo storico 1961-2010 al 72%. Di questo 72% solo il 14% rientra nella sottozona fredda mentre il 58% del territorio è classificato come *Lauretum* di sottozona media o calda.

Da sottolineare come l'8 % del territorio regionale, localizzato nella media e bassa pianura friulana, sulla laguna sulla costa e parte del Carso, non solo rientri nella zona del *Lauretum* medio o caldo ma evidenzi anche una siccità estiva. È utile sottolineare che questa valutazione di siccità climatica esula da considerazioni circa la natura dei suoli. Ad esempio già attualmente il Carso è considerato una zona dove durante l'estate il rifornimento idrico delle colture risulta essere limitato, ma questo ha a che fare con la scarsa capacità di ritenuta idrica dei suoli dell'altopiano e non tanto con la pluviometria. Inoltre si assiste alla scomparsa di zone classificate come *Alpinetun* e l'*Picetum* si riduce a meno del 2 % della superficie regionale. Riguardo alla zona del *Fagetum* si riduce dal 21 al 15 % interessando zone a quota altimetrica più elevata. Il *Castanetum* interessa solo zone di quota e non risulta presente neanche nei fondi valle delle valli alpine regionali più elevate.

Conclusioni

Il lavoro qui esposto presenta delle ovvie semplificazioni, prima fra tutte l'ipotesi di una variazione uniforme sul territorio del regime termopluviometrico tra il clima presente e quelli futuri. In tale modo la diversificazione territoriale termopluviometrica nei climi futuri riproduce essenzialmente quella storica. Si ritiene comunque che nell'ambito di un lavoro preliminare questa semplificazione possa essere considerata accettabile.

I risultati di questo breve studio illustrano come il panorama vegetazionale del Friuli Venezia Giulia potrà modificarsi nel futuro in funzione dei cambiamenti climatici.

Se consideriamo lo scenario emissivo più severo (RCP 8.5) a fine secolo le zone di elezione delle conifere microterme (ovvero la zona D nella classificazione di Köppen e *Picetum* in quella di Pavari) si ridurranno a percentuali molto limitate. I climi montani, seminivale in Köppen e *Alpinetum* in Pavari, dovrebbero risultare del tutto assenti.

Anche il *Fagetum* e ancor più il *Castenetum* subiranno una forte contrazione e interesseranno solo zone di alta quota, non risultando presenti neppure nei fondivalle delle valli alpine regionali più elevate.

Si assisterà ad un sostanziale aumento dei climi mesotermici più caldi, Cfa nella classificazione di Köppen e *Lauretum* per Pavari. Addirittura una porzione importante della regione sarà fitoclimaticamente classificata come *Lauretum* caldo con siccità estiva. Ricordiamo che in questa sottozona vegetano specie termofile e soprattutto termoxerofile: per le piante arboree spontanee si annoverano tra le latifoglie la sughera, il leccio, il carrubo, l'olivastro e tra le conifere il pino domestico, pino d'Aleppo, il pino marittimo, tutti i cipressi e i ginepri termofili. Per quanto concerne l'agricoltura, il *Lauretum caldo* è l'areale per eccellenza degli agrumi, dell'olivo e del fico. In questa zona climatica vi è la possibilità che diverse cultivar di fruttiferi, tipici dell'agricoltura friulana, come drupacee quali ciliegio o pesco, o pomacee come il melo e il pero, in certi anni non giungano a fruttificare a causa del mancato raggiungimento del fabbisogno in freddo.

La zona del *Lauretum* medio e freddo nello scenario più severo a fine secolo coprirà buona parte della pianura e molti fondivalle alpini. Ricordiamo che questa sottozona fitoclimatica è oggi quella tipica della viticultura di zone

meridionali d'Italia. Si può quindi ipotizzare uno spostamento a quote più elevate e a un generale adattamento agronomico, varietale e tecnico della viticoltura regionale.

Nel panorama emissivo meno severo (RCP 2.6) i panorami vegetativi non subiranno invece delle modifiche sostanziali.

Indagini eseguite sull'ensemble degli stessi modelli con un panorama emissivo RCP 4.5 (dati non mostrati) mostrano delle situazioni intermedie a quelle sopra illustrate.

Parte 2: RICOGNIZIONE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI.

Dai documenti nazionali alle prime considerazioni per il FVG

Coordinamento: Federica Flapp - ARPA-FVG – S.O.C. OSMER e GRN; Lucia Piani – Università di Udine

Autori dei capitoli tematici:

Andrea Cicogna, Federica Flapp, Giada Venier - ARPA-FVG - S.O.C. Osmer e GRN

Claudia Meloni, Nicola Skert - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente - Funzione Qualità dei suoli e biodiversità

Arianna Macor, Gabriele Piazza, Erica Rancati, Alessandra Sinesi, Damiano Virgilio, Elisa Zanut, Raffaella Zorza S.O.C. Stato dell'ambiente - ARPA-FVG - S.O.S. Qualità acque interne

Francesca Tassan, Pierluigi Verardo - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente - S.O.S. Qualità dell'aria

Alessandro Acquavita, Nicola Bettoso - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente - S.O.S. Qualità acque marine e di transizione

Valentina Gallina– ICTP - International Centre for Theoretical Physics, Earth System Physics

Gli autori dei *focus* inseriti in alcuni capitoli sono riportati in testa ai rispettivi contributi.

Su alcuni capitoli è stato già possibile in questa fase ad avviare momenti di dialogo, confronto e condivisione con alcuni esperti e operatori di diversi settori. Si ringraziano per aver fornito i loro utilissimi punti di vista, suggerimenti, osservazioni:

Francesco Marangon - Dipartimento di Scienze Economiche e Statistiche, Università degli Studi di Udine

Franca Battigelli - Dipartimento di Studi umanistici e del Patrimonio culturale, Università degli Studi di Udine

Giorgio Alberti - Dipartimento di Scienze agroalimentari, ambientali e animali, Università degli Studi di Udine

Ivonne Caliz, Luca della Vedova, Andrea Peresson, Sandro Venturini - Dipartimento di Prevenzione dell' AAS3 "Alto Friuli, Collinare, Medio Friuli"

2.1 Gli impatti dei cambiamenti climatici descritti a livello nazionale come base di partenza per analisi regionali condivise

Gli impatti che i cambiamenti climatici hanno e avranno in Italia sui diversi sistemi naturali e settori socio-economici sono stati descritti a livello nazionale in alcuni studi che hanno coinvolto le principali istituzioni ed esperti del settore.

Per il presente studio regionale, si è cercato di riassumere gli impatti descritti a livello nazionale in modo da offrire a cittadini, decisori e portatori di interesse una panoramica utile per iniziare a contestualizzare i diversi impatti rispetto al territorio e alle diverse realtà del Friuli Venezia Giulia.

Fonti e documenti nazionali sugli impatti dei cambiamenti climatici: SNACC, PNACC, indicatori SNPA

Negli ultimi anni gli impatti dei cambiamenti climatici sui diversi sistemi naturali e settori socio-economici sono stati oggetto di un numero crescente di studi e analisi, sia a livello internazionale che in riferimento al nostro Paese, condotti da Università, centri di ricerca, enti e specialisti operanti in molteplici aree disciplinari.

Questa vasta produzione di conoscenze tecnico-scientifiche fornisce la base imprescindibile per qualsiasi politica tesa a contenere i cambiamenti climatici e a gestirne al meglio gli inevitabili impatti.

In Italia, il grande impegno profuso per la redazione della *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNACC, 2015) e del successivo *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (PNACC, 2017) fortemente voluti dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), ha fornito il contesto e gli strumenti per raccogliere e convogliare verso un obiettivo comune la conoscenza prodotta a livello nazionale sui cambiamenti climatici e i loro impatti, insieme alle vulnerabilità e ai possibili adattamenti.

Per redigere la **SNACC**, un centinaio di esperti dei diversi settori hanno lavorato per due anni (2012-2014), con il coordinamento tecnico-scientifico complessivo a cura del Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC): suddivisi in gruppi di lavoro tematici, hanno redatto i **documenti preparatori per la Strategia** (http://www.minambiente.it/pagina/documenti-di-supporto-alla-strategia-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici), tra i quali il *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia* (Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014), che attualmente fornisce la base conoscitiva più ampia sugli impatti dei cambiamenti climatici nel nostro Paese. Sulla base delle informazioni fornite dal Rapporto e dagli altri documenti preparatori è stata poi redatta la SNACC (2015), che riporta una sintesi degli impatti in corso e previsti in Italia. Il **PNACC** (2017, in corso di approvazione) a sua volta riprende e rielabora ulteriormente la descrizione degli impatti a livello nazionale.

Per integrare le informazioni sugli impatti raccolte nella SNACC con strumenti che consentano di quantificare e monitorare tali impatti, nel 2016 è stato attivato il **Gruppo di Lavoro "Impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici" del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA)** che sta definendo un

set di **indicatori di impatto** dei cambiamenti climatici a livello nazionale e ha prodotto un primo report *Introduzione agli indicatori di impatto dei cambiamenti climatici: concetti chiave e indicatori "candidati"* (SNPA, 2017).

Nell'avviare nel 2017 il presente studio sui cambiamenti climatici e i loro impatti in Friuli Venezia Giulia, si è ritenuto quindi utile partire da questi documenti nazionali, effettuando innanzitutto una ricognizione degli impatti che essi descrivono per l'intero territorio italiano.

I settori di impatto: ricognizione e allineamento dello studio regionale rispetto ai documenti nazionali

I cambiamenti climatici producono effetti molteplici e tra loro collegati da complesse relazioni, sia sui sistemi naturali che sui contesti socio-economici. Come ordinare e proporre al pubblico le conoscenze relative a un tema così complesso? Il *Rapporto sullo stato delle conoscenze* e il documento di sintesi conclusivo della SNACC individuano una serie di temi/settori nei quali sono organizzate le informazioni su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici. Questa "classificazione" degli impatti è stata poi ripresa, con qualche limitata rielaborazione, dal PNACC e dal lavoro del GdL SNPA sugli indicatori di impatto.

ARPA FVG, nell'interpretare il mandato dell'Amministrazione Regionale (DGR 1890/2016) e il proprio ruolo all'interno del SNPA, ha ritenuto importante svolgere una funzione di **tramite e collegamento tra le conoscenze e le linee guida prodotte a livello nazionale e le specificità del nostro territorio**. Nell'impostare il presente studio regionale si è quindi scelto di garantirne una coerenza con l'impianto dei documenti nazionali e si è quindi adottata la medesima articolazione dei temi/settori di impatto:

- Quantità e qualità delle Risorse idriche
- Desertificazione, degrado del territorio e siccità
- Dissesto idrogeologico
- Biodiversità ed ecosistemi
    - Ecosistemi terrestri
    - Ecosistemi marini
    - Ecosistemi di acque interne e di transizione: biodiversità, funzioni e servizi dell'ecosistema
- Salute
- Foreste
- Agricoltura, pesca e acquacoltura
    - Agricoltura e produzione alimentare
    - Pesca marittima
    - Acquacoltura
- Energia
- Zone costiere
- Turismo
- Insediamenti urbani
- Infrastruttura critica
    - Patrimonio culturale
    - Trasporti e infrastrutture
    - Industrie e infrastrutture pericolose

I seguenti capitoli (2.1 – 2.19) riprendono quindi le tematiche di cui sopra: alcune di queste trovano riscontro diretto nelle competenze tecnico-scientifiche espresse dalle strutture di ARPA FVG, mentre altre esulano dal campo di attività proprio dell'Agenzia. Su queste ultime, in alcuni casi si è riusciti già in questa fase ad attivare forme e momenti di condivisione e confronto con soggetti esperti dei diversi settori: ciò ha consentito di formulare anche alcune considerazioni sulla rilevanza dei diversi impatti in riferimento al contesto regionale. In altri casi si è semplicemente svolto un lavoro di ricognizione, selezione, sintesi e rielaborazione dei documenti nazionali, che si intende proporre come base per un successivo confronto con esperti e portatori di interesse dei diversi ambiti interessati.

Impostazione dei capitoli tematici

Con l'obiettivo di rendere un servizio effettivamente utile agli utenti della regione, si è scelto di realizzare un prodotto che non si sovrapponga a quelli già esistenti, ma che fornisca strumenti diversi e più immediati per accedere alle informazioni fondamentali: si è quindi deciso di operare una sintesi dell'enorme patrimonio di conoscenze prodotte nell'ambito dei documenti nazionali, ricavandone i concetti fondamentali e schematizzando la trattazione degli impatti in una forma che faciliti la loro contestualizzazione rispetto alla realtà regionale e che agevoli ciascun portatore di interesse nell'individuare gli impatti che più da vicino lo possono riguardare.

Per ogni capitolo, dedicato a un singolo tema/settore, è stata compilata una **matrice** in cui si riporta l'elenco degli impatti descritti a livello nazionale, con l'obiettivo di poter formulare per ciascun impatto delle considerazioni in riferimento al FVG (in certi casi sono riportate alcune prime considerazioni, ma in generale dovranno essere oggetto di approfondimenti successivi).

Generalmente la matrice è preceduta da un **testo introduttivo**, che consenta anche ai non esperti di farsi un'idea di come ciascun settore venga toccato dai cambiamenti climatici, ed è seguita da un testo in cui si evidenziano e si sintetizzano le **informazioni ritenute più interessanti per il contesto regionale**.

Parte dei testi sono ripresi direttamente dai documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi studi preparatori), ove questi risultino già particolarmente chiari ed utili a riepilogare i contenuti fondamentali degli argomenti trattati. A seconda dei casi, si è provveduto a riassumere, rielaborare e talvolta integrare le informazioni con altre fonti ritenute particolarmente utili alla comprensione degli argomenti, inclusi alcuni schemi e immagini.

Per alcune tematiche, alla ricognizione degli impatti si aggiunge un **"focus"** che mette in luce alcuni aspetti specifici dell'argomento trattato. I focus sono stati realizzati sia dai tecnici di ARPA FVG già autori della ricognizione impatti, sia da esperti esterni citati nei rispettivi contributi.

Per chi fosse interessato a consultare le **fonti originali** per approfondire la conoscenza degli impatti nei diversi settori, in fondo ad ogni capitolo sono indicate le pagine che trattano l'argomento specifico nei documenti nazionali:

- *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*
- *Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici*

A seconda delle tematiche affrontate, sono state talora consultate anche altre fonti, per lo più regionali: queste sono pure elencate alla fine del capitolo, con i relativi link ipertestuali ove disponibili. Sono infine riportate eventuali

ulteriori fonti bibliografiche utili ad approfondire l'argomento, segnalate dagli autori dei capitoli e/o dei *focus* tematici.

Tutta questa parte 2 dello studio non va quindi intesa come una trattazione approfondita ed esaustiva degli impatti che i cambiamenti climatici hanno e potranno avere sui diversi sistemi naturali e settori socio-economici in Friuli Venezia Giulia: la "ricognizione", cosi come è stata impostata, in forma prevalentemente sintetica e descrittiva, intende proporre una base conoscitiva quanto più accessibile a decisori, portatori di interesse, cittadini attenti, sulla quale poter successivamente intavolare forme di dialogo, confronto e condivisione che consentano di intraprendere percorsi di mitigazione e di adattamento ai cambiamenti climatici mirati e coerenti con le specificità del nostro territorio regionale.

2.2 Quantità e qualità delle risorse idriche

Come evidenziato negli studi realizzati per la Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNACC), lo stato delle risorse idriche non presenta, in generale, gravi criticità in termini di **disponibilità annuale complessiva**, ma soffre piuttosto di una disomogenea **disponibilità nel tempo e nello spazio**, e di criticità gestionali. Questa situazione può provocare, in certi ambiti, delle diffuse e profonde alterazioni dei regimi idrologici naturali a causa dall'eccessiva pressione dei prelievi.

I fattori climatici che possono influenzare negativamente questa importante risorsa sono le variazioni nei cicli delle precipitazioni e della neve, i cambiamenti nella sua qualità, come la temperatura e il tasso di nutrienti, la fusione accelerata dei ghiacciai e l'aumento della frequenza e dell'intensità dei periodi di siccità e delle inondazioni, soprattutto in forma di *flash floods* (piene improvvise).

Torrente Degano in Val Fleons (Forni Avoltri, UD)

Nella tabella 2.2.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tab 2.2.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sulle risorse idriche, come descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)				**IMPATTI SPECIFICI**	**DESCRIZIONE IMPATTI**	CAUSE CLIMATICHE
Ciclo idrologico	**Stato ecologico dell'ambiente acquatico**	**Stato morfologico dei corpi idrici**	**Risorse idropotabili**			
X	**X**	**X**	**X**	**Diminuzione delle disponibilità idriche**	Diminuzione dei deflussi superficiali nei corsi d'acqua e di quelli profondi che ricaricano gli acquiferi nel periodo estivo. Aumento dell'intrusione di acqua marina nelle falde acquifere costiere. Aumento della domanda di acqua e delle situazioni di conflitto tra usi diversi.	Aumento delle temperature medie estive, riduzione delle precipitazioni estive, innalzamento del livello del mare
X	**X**	**X**	**X**	**Aumento degli eventi alluvionali**	Aumento delle esondazioni dei fiumi e dei sistemi di drenaggio per l'arrivo improvviso di un elevato carico d'acqua.	Aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi piovosi estremi
	X	**X**	**X**	**Aumento dei periodi di siccità**	Allungamento dei periodi di assenza di precipitazione estiva, che sommato alle temperature elevate, producono criticità idriche.	Aumento delle temperature medie estive, riduzione delle precipitazioni estive
X	**X**	**X**		**Intensificazione del ciclo idrologico**	Spostamenti dei cicli di pioggia e neve.	Aumento delle temperature medie
	X		**X**	**Cambiamenti nella qualità delle acque**	Modifiche dello stato qualitativo delle sorgenti e dei corpi idrici superficiali in termini di temperatura, contenuto di nutrienti, concentrazione di ioni metallici, salinità e stato igienico-sanitario.	Aumento delle temperature medie, innalzamento del livello del mare
X	**X**		**X**	**Fusione dei ghiacciai**	Fusione accelerata degli accumuli di ghiaccio e neve presenti in alta quota nel periodo estivo e scarso recupero nel periodo invernale.	Aumento delle temperature medie, calo delle precipitazioni nevose
X	**X**			**Riduzione dell'apporto idrico da parte dei nevai**	Anticipo del picco di portata primaverile da maggio ad aprile e diminuzione del deflusso per l'intero anno, con conseguenze sulla stabilità delle portate stagionali e sulla variabilità intra-annuale.	Aumento delle temperature medie, diminuzione delle precipitazioni nevose

Gli impatti dei cambiamenti climatici possono interessare lo **stato ecologico dell'ambiente acquatico**, lo **stato morfologico dei corpi idrici**, le **risorse idropotabili** e i **cicli idrogeologici**.

Per quanto riguarda le risorse idropotabili, ci si attende un potenziale aumento degli episodi siccitosi durante l'estate con conseguente minore **disponibilità d'acqua** nei corpi idrici superficiali e ricadute sulla rete irrigua agricola e idropotabile. Soprattutto nei periodi estivi, quando la richiesta d'acqua è maggiore, l'aumento dell'evapotraspirazione e una riduzione delle portate dei fiumi, dovuta anche alla fusione prematura del manto nevoso, potranno contribuire ad una forte diminuzione delle acque superficiali disponibili, con conseguente aumento dei prelievi sotterranei e inevitabile depauperamento delle riserve. Quest'ipotesi non potrà che aggravare il generale abbassamento dei livelli della falda freatica osservato dagli anni '70 a oggi (valori medi tra i 5 e 10 cm all'anno). Si può quindi attendere un acuirsi dei conflitti per l'uso di una risorsa via via più ridotta e di più scarsa qualità.

L'intensificarsi della frequenza e della durata dei periodi di siccità, inoltre, potrebbe incrementare i periodi di secca specie dei corsi d'acqua a regime torrentizio e portare quindi a drammatiche **modifiche degli habitat** e all'aumento della concentrazione di inquinanti. La riduzione della ricarica naturale e il contemporaneo aumento dei prelievi per gli acquiferi determinerebbero un **peggioramento della loro qualità**, in particolare per gli acquiferi costieri soggetti anche all'intrusione di acque salate all'interno delle falde di acque dolci.

A causa dell'aumento dell'energia termica in atmosfera, ci si attende anche la modifica del ciclo idrologico che porterà ad un aumento della gravità (e/o della frequenza) di **inondazioni e alluvioni**, soprattutto in corrispondenza di periodi autunnali e invernali piovosi e caldi, con conseguenze negative sia sullo stato dei corpi idrici, che sullo stato ecologico degli ambienti acquatici.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 25
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 84-96
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 14-34

Altre fonti consultate:

- *Vulnerabilità naturale del Friuli Venezia Giulia*, Direzione centrale ambiente ed energia – Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015

Vedi anche il caso studio:

3.1 *Effetti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica in Friuli Venezia Giulia*

2.3 Desertificazione, degrado del territorio e siccità

Il suolo è lo strato più superficiale della crosta terrestre, di spessore variabile, che deriva dalla decomposizione di rocce preesistenti e di materiale organico a causa dell'azione congiunta di agenti fisici, chimici e biologici. È considerato una **risorsa non rinnovabile**, ricco di biodiversità che lo rende fertile, il cui degrado si traduce in una perdita della sua produttività da un punto di vista biologico, agronomico ed economico. Il degrado del territorio e la desertificazione sono processi che risultano per effetto dell'interazione tra i cambiamenti climatici e il sovrasfruttamento delle risorse naturali, del suolo, dell'acqua e della vegetazione da parte dell'uomo. La desertificazione ne rappresenta il livello più estremo e rappresenta una perdita di suolo irreversibile.

Nella tabella 2.3.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sulla desertificazione, il degrado del territorio e la siccità descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tabella 2.3.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sul suolo descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)		IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Riduzione della qualità del suolo	**Perdita di suolo**			
x		**Ridotta formazione delle sostanze umiche del suolo**	Maggiore mineralizzazione della sostanza organica nel suolo a scapito della formazione delle sostanze umiche	Riduzione delle piogge medie e aumento temperatura media
x		**Perdita delle sostanze umiche del suolo**	Distruzione dello strato umico del suolo causata dall'aumento della frequenza degli incendi	Diminuzione delle piogge e della loro frequenza
x		**Salinizzazione**	Ingresso del cuneo salino dovuto all'aumento del livello medio del mare, ai fenomeni di subsidenza e all'abbassamento delle falde superficiali	Diminuzione delle piogge e aumento del livello del mare
	x	**Erosione idrica del suolo**	Aumento frequenza alluvioni, esondazioni e frane e conseguente incremento dell'azione erosiva delle acque	Aumento dei fenomeni precipitativi intensi
	x	**Desertificazione**	Incremento significativo dell'aridità dei suoli con completa mineralizzazione della sostanza organica (rimane solo la matrice inorganica, non si tratta più di "suolo")	Diminuzione delle piogge e della loro frequenza

In ambito regionale i macro impatti previsti sono relativi alla **perdita di suolo** e ai fenomeni di degrado che saranno a carico soprattutto della fascia montana, dei magredi, dell'altipiano carsico, della bassa pianura friulana e della fascia costiera.

Per quanto concerne la **riduzione della qualità del suolo**, l'aumento della temperatura media e la diminuzione delle piogge, soprattutto in estate (vedi cap 1.2 Proiezioni climatiche - Precipitazioni e relative mappe), porterà presumibilmente a una maggiore **mineralizzazione della sostanza organica** nel suolo a scapito della formazione delle sostanze umiche, danneggiando gli ecosistemi terrestri, in particolare il settore delle foreste, dell'agricoltura e della produzione alimentare.

Un **indice climatico** che descrive sinteticamente tale fenomeno è quello di Lang, basato sul rapporto tra valori medi annui di precipitazione e temperatura. Oggi tale indice per il FVG si attesta intorno a 190, valore che identifica un clima umido. Tenendo conto degli scenari più pessimistici, ovvero un aumento della temperatura globale di 4 °C a fine secolo (e anche di più in Friuli Venezia Giulia), si può stimare nel periodo 2071-2100 una riduzione media, a livello regionale, del 30-40 % dell'indice di Lang. In particolare, nella fascia costiera si prevede un valoreinferiore a 60, corrispondente a un clima semiarido. Un'ulteriore perdita di sostanza organica sarà dovuta al previsto aumento della frequenza degli incendi, soprattutto durante il periodo estivo in concomitanza con crescenti fenomeni siccitosi.

In sintesi, la riduzione della qualità del suolo sarà probabilmente generalizzata, ma particolarmente rilevante nella bassa pianura friulana e soprattutto lungo la fascia costiera, soggetta anche a un graduale processo di **salinizzazione** causato sia dall'aumento del livello del mare che dai fenomeni di subsidenza. Il fenomeno sarà anche favorito dall'abbassamento del livello delle falde acquifere.

Per quanto concerne la **perdita di suolo**, il possibile incremento dei fenomeni precipitativi estremi (vedi cap 1.2 Proiezioni climatiche - Eventi estremi e relative mappe), spesso associati alle alluvioni, si tradurrà prevedibilmente in un aumento della forza erosiva delle acque e quindi in una perdita di suolo, soprattutto nella fascia montana. Al contrario, alla diminuzione delle piogge medie e della loro frequenza (vedi cap 1.2 Proiezioni climatiche - Precipitazioni e relative mappe) si collega un maggiore rischio di **desertificazione** nelle aree vulnerabili della regione, quali magredi e altipiano carsico, i cui suoli sono caratterizzati da scheletro grossolano, spesso poco profondo: qui la capacità di ritenzione idrica è di conseguenza molto bassa, mentre è favorita la penetrazione dell'acqua negli strati profondi a discapito di quelli superficiali e quindi della vegetazione.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 26-27
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 119-134
- *PNACC -Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017–pag. 97-122

FOCUS I cambiamenti climatici come minaccia della biodiversità nei suoli

Claudia Meloni, Nicola Skert - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente –
Funzione Qualità dei suoli e biodiversità

Non sembra, ma il suolo sul quale trascorriamo la nostra esistenza è uno tra gli habitat con maggiore **biodiversità** e **densità "abitativa**". Ad esempio, in un solo metro quadrato di foresta a faggio possono convivere mille specie di invertebrati e, in generale, un singolo grammo di suolo può ospitare milioni di individui e centinaia di specie di batteri.

Sono numeri importanti che esprimono la vitalità di un ambiente generalmente ignorato dall'uomo, il cui impoverimento tuttavia genera problemi tutt'altro che ignorabili. Una perdita di biodiversità del suolo implica una **riduzione della sua fertilità** e quindi della capacità delle piante di svilupparsi, a discapito di tutti quegli organismi, uomo compreso, che dalla vegetazione dipendono. Per formarsi il suolo ci impiega letteralmente secoli, pertanto è considerato una risorsa non rinnovabile e come tale va adeguatamente tutelato.

I cambiamenti climatici rappresentano una seria minaccia per la biodiversità dei suoli e quindi per la loro fertilità. L'intensificarsi degli eventi estremi inducono da una parte **fenomeni erosivi o di lisciviazione**, che si traducono in una perdita meccanica dell'habitat suolo, dall'altra **fenomeni siccitosi più prolungati** che mettono a dura prova la sua resistenza biologica.

ARPA FVG, sulla base di queste considerazioni, sta affiancando all'analisi chimico-fisico del suolo anche quella biologica, tramite il **metodo QBS (Qualità Biologica del Suolo)**, analisi che permette di studiare alcuni aspetti della sua biodiversità e quindi dello stato di salute del terreno. In particolare si analizza la **mesofauna**, caratterizzata da invertebrati di dimensioni generalmente inferiori ai 2 mm, le cui comunità risentono oltre che delle "tradizionali" pressioni antropiche, anche delle variazioni di umidità (con un optimum tra il 14 e il 35 %) e della temperatura del suolo.

Nell'ambito di un progetto più esteso, al fine di selezionare delle "**stazioni di monitoraggio**" a lungo termine dei cambiamenti climatici, la metodica è stata applicata sia nei **suoli indisturbati** (o quasi) dei prati stabili, incolti ecc, che in quelli **"naturalmente" disturbati** per le condizioni ecologiche più estreme, quali torbiere, praterie alpine, barene, dove le comunità sono più fragili e quindi più sensibili a registrare le variazioni climatiche. I primi studi si sono quindi concentrati sull'arco alpino, nella pianura isontina e nella laguna di Grado, per un totale di 21 stazioni come è visibile nella figura. 2.3.1.

figura 2.3.1 – Carta regionale delle stazioni di monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sul suolo

I risultati confermano che a condizionare negativamente lo sviluppo delle comunità di microinvertebrati è soprattutto **l'umidità**, ma questo effetto viene apparentemente compensato dal **grado di maturità** del suolo. Al di fuori dal range di optimum, comunque, l'aridità condiziona la comunità maggiormente rispetto ai livelli di umidità elevati.

Si prevede quindi di selezionare alcune stazioni di monitoraggio a lungo termine, soprattutto nelle due fasce bioclimatiche che maggiormente risentiranno dei cambiamenti climatici, vale a dire la fascia costiera e quella montana.

2.4 Dissesto idrogeologico

Con il termine "dissesto idrogeologico" si indica un insieme di processi di degradazione del territorio e del suolo che, al verificarsi di determinate condizioni meteorologiche, possono originare vari eventi di varia gravità come frane, esondazioni, alluvioni, dissesti di carattere torrentizio e sprofondamenti.

Le forzanti climatiche che hanno un effetto maggiore sul livello di dissesto idrogeologico sono la temperatura e le precipitazioni; la prima incrementa la fusione nivale, soprattutto se associata a pioggia, le precipitazioni molto intense, invece, possono provocare fenomeni di piena e/o frane.

Nella tabella 2.4.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici relativi al dissesto idrogeologico, descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

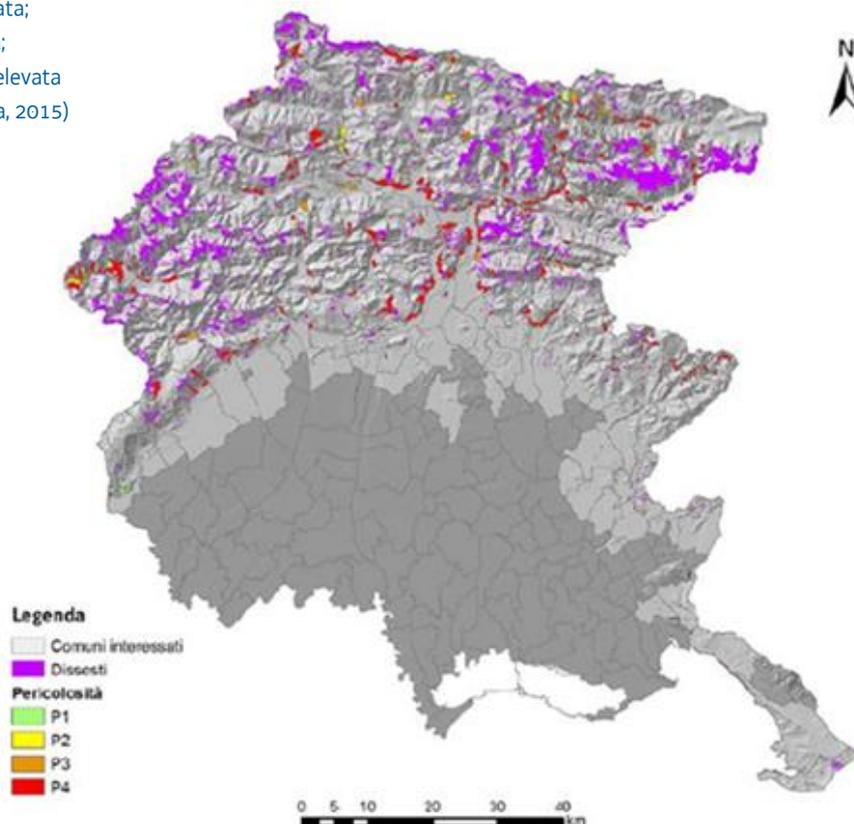
tabella 2.4.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sul dissesto idrogeologico, come descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)		IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Aumento del rischio idraulico	Aumento instabilità della litosfera			
	X	**Aumento degli eventi franosi**	Aumento delle frane e dei crolli in corrispondenza di eventi precipitativi concentrati e molto intensi.	Aumento della frequenza e intensità delle precipitazioni estreme
	X	**Riduzione degli eventi franosi da gelo-disgelo**	Riduzione degli eventi di gelo-disgelo e quindi delle frane da esso provocate.	Aumento delle temperature medie invernali
X	X	**Aumento dell'instabilità dei versanti in montagna e in collina**	Aumento degli episodi di colate detritiche e dei processi torrentizi attivatisi in area montana. Inoltre un clima diverso dall'attuale e l'aumento degli incendi comportano cambiamenti della densità e della tipologia della vegetazione, con ripercussioni sulla stabilità degli strati superficiali del suolo.	Aumento della frequenza e intensità delle precipitazioni estreme Aumento delle temperature medie annuali e aumento degli incendi
	X	**Variazioni del fronte del permafrost**	Variazione del numero di frane attive o di nuova attivazione in area alto-montana	Aumento delle temperature medie, calo delle precipitazioni nevose
X	X	**Aumento delle piene e degli eventi alluvionali**	L'aumento di intensità delle precipitazioni causa l'aumento degli episodi di inondazione e/o delle criticità per i bacini idrologici.	Aumento della frequenza e intensità delle precipitazioni estreme
X	X	**Aumento delle inondazioni costiere**	Allargamento delle aree potenzialmente allagabili per il fenomeno dell'acqua alta e trasgressione marina (allagamenti da acqua marina)	Innalzamento del livello del mare, aumento delle mareggiate
X		**Disagi nella gestione di dighe e invasi**	Aumento del rischio di inondazione e minor possibilità di operare rilasci controllati.	Aumento della frequenza e intensità delle precipitazioni estreme

I cambiamenti climatici potrebbero portare un **aumento** sia **del rischio idraulico** che dell'**instabilità dei versanti**. Tutto il territorio regionale (montano, pedemontano e carsico) del Friuli Venezia Giulia è fortemente interessato da fenomeni di dissesto idrogeologico, con un deciso numero di frane attive. Le aree più colpite dagli episodi di **frana, di colate detritiche** e sinkhole sono quelle montane (Alpi Carniche e Giulie. I **sinkhole** sono fenomeni di sprofondamento improvviso, di forma sub-circolare e profondi da pochi a una decina di di metri, che si originano a causa della dissoluzione di formazioni evaporitiche. Nelle aree urbane invece si formano per per cedimenti o collassi della rete fognaria o dei rii interrati dovuti all'aumento della portata idrica causata, anche in questo caso, dai fenomeni metereologici estremi e improvvisi (vedi focus: *Formazione di sinkhole e cambiamenti climatici*).

I cambiamenti climatici potrebbero **modificare i processi di versante** e **aumentare l'instabilità** dei pendii, specialmente in alta montagna, poiché la fusione di neve, ghiaccio e permafrost, e l'incremento, con l'innalzamento dell'isoterma zero, delle precipitazioni piovose rispetto a quelle nevose (specialmente in forma di eventi di intensità breve ed abbondante) provocano un aumento dell'apporto idrico e quindi il verificarsi di piene torrentizie e colate detritiche potenzialmente pericolose. Anche altri processi correlati al riscaldamento climatico, come la **fusione del permafrost**, che agisce da "collante" nelle fratture rocciose, la **contrazione delle masse glaciali**, e il conseguente rilascio tensionale, e il **mancare della copertura niveo-glaciale**, che determina una maggiore esposizione agli agenti atmosferici, concorrono ad aumentare il rischio di frana.

Grazie ai dati del progetto IFFI e dei Piani d'Assesto Idrogeologico (PAI) del catasto frane regionale, il Servizio geologico e il Servizio di difesa del suolo della Regione hanno prodotto la mappatura delle aree interessate da eventi franosi in funzione del livello di pericolosità determinato dalla normativa vigente (fig. 2.4.1).

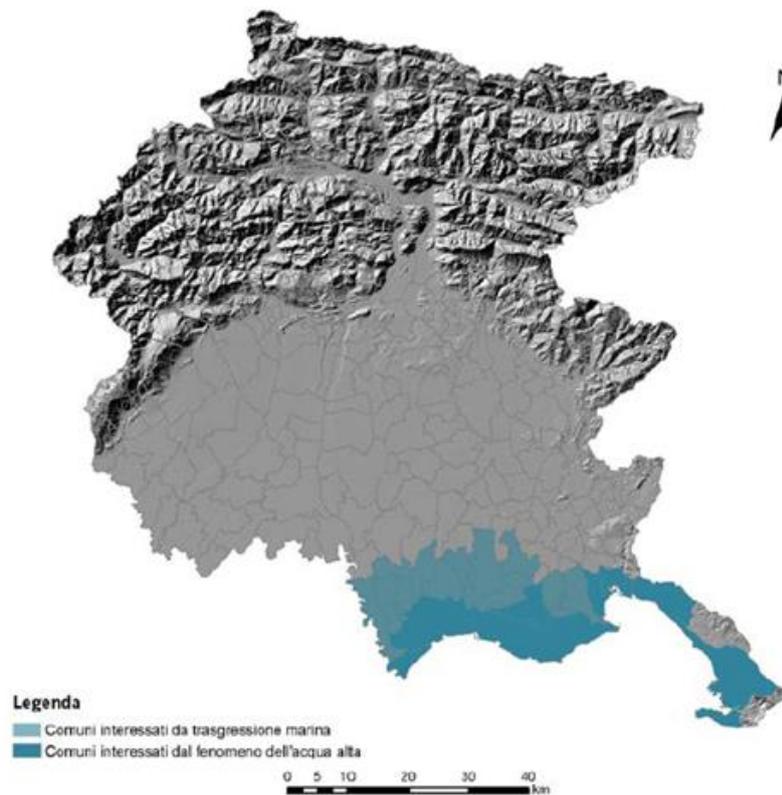
fig 2.4.1 – Mappa delle aree soggette a rischio di frana
P1 - aree a pericolosità da frane bassa;
P2 - aree a pericolosità da frane moderata;
P3 - aree a pericolosità da frana elevata;
P4 - aree a pericolosità da frane molto elevata
(Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015)

La minore disponibilità di risorse idriche sotterranee e l'incremento delle attività di emungimento possono poi indurre movimenti significativi della tavola d'acqua freatica ed essere all'origine di squilibri nella circolazione idrica nel sottosuolo, provocando episodi di **sinkhole** (vedi focus: *Formazione di sinkhole e cambiamenti climatici*).

La franosità, in particolare quella a carattere superficiale, dipende anche dalle condizioni e dalla tipologia di **copertura e uso del suolo**, che i cambiamenti climatici possono influenzare in modo sia diretto che indiretto. Un clima diverso dall'attuale comporta cambiamenti nella densità e nella tipologia di vegetazione, la quale svolge un duplice ruolo nel miglioramento delle condizioni di stabilità dei versanti: da un lato riduce il contenuto d'acqua medio nel suolo attraverso i processi di evapotraspirazione e di intercettazione della precipitazione, dall'altro rafforza la stabilità del terreno, soprattutto nei primi strati del sottosuolo, grazie agli apparati radicali. Nelle aree colpite da **incendi**, inoltre, non c'è vegetazione che possa intercettare la pioggia, e ciò provoca l'aumento dell'erosione e lo sviluppo di fenomeni franosi superficiali.

Nelle aree critiche, dove il cambiamento climatico si sovrapporrà ad un cambiamento idrologico, in larga parte dovuto alle attività dell'uomo, le forti piogge potrebbero provocare fenomeni di **esondazione e alluvione**, e di conseguenza variazioni importanti nel regime del trasporto solido e sedimentologico dei fiumi fino ad arrivare a fenomeni di dissesto degli alvei, dei versanti e zone limitrofe alle aste fluviali. Nei territori della bassa pianura che scaricano nelle lagune o in mare, ci potrebbero essere ulteriori **difficoltà di smaltimento delle portate di piena** ad eventi in fase con fenomeni di acqua alta, acuiti dall'innalzamento del livello del mare.

Esondazione di un fiume ed evento di mareggiata

Le **inondazioni marine** interessano i comuni del territorio regionale che rivestono una notevole importanza per l'economia regionale, e pertanto potrebbero comportare gravi perdite a livello socio-economico. I fenomeni di subsidenza, ovvero il lento processo di abbassamento del suolo di origine naturale o antropica, interessano anche la nostra regione, in particolare l'area lagunare della bassa pianura friulana, con abbassamenti dai 0 ai 3 mm/anno e punte fino a 5 mm/anno, a seconda del sito. Questo rende il nostro territorio ancora più esposto agli effetti dell'innalzamento del livello del mare e dell'aumento delle inondazioni (fig. 2.4.2)

fig 2.4.2 – Mappa dei comuni con aree potenzialmente allagabili per il fenomeno dell'acqua alta e la trasgressione marina in ambito fluviale. (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015)

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 27-29
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 143-162
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 83-90

Altre fonti consultate:

- *Impatti dei cambiamenti climatici sul territorio fisico regionale,* Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015

Vedi anche il caso studio:

3.3 *Dissesto idrogeologico: eventi precipitativi ed eventi alluvionali*

FOCUS Formazione di sinkhole e cambiamenti

Paolo Maddaleni - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente –
Funzione Qualità dei suoli e biodiversità

I **sinkhole** sono cavità di forma semi circolare con dimensioni e profondità variabili che si aprono su terreni a litologie diverse per determinate cause naturali o antropiche. Per la loro improvvisa formazione e per la loro scarsa prevedibilità costituiscono un pericolo concreto, soprattutto in aree urbane in cui vengono coinvolte infrastrutture viarie e abitative. Nella genesi dei sinkhole, sia in ambiente naturale che in quello urbano, giocano un ruolo fondamentale le rilevanti **oscillazioni del livello piezometrico**, soprattutto quelle conseguenti all'alternanza di periodi secchi e piovosi.

La recrudescenza di eventi metereologici estremi legati ai cambiamenti climatici possono causare **variazioni di portata e di livello delle falde acquifere** tali da influire sulla solubilità dei suoli, inducendo la formazione di vuoti e conseguente cedimento del sedimento sovrastante, come osservato in zone della Carnia nelle formazioni triassiche. L'incremento dell'intensità delle precipitazioni possono portare anche ad un **collasso del sistema di drenaggio fognario cittadino**, con esplosione e cedimenti delle tubazioni, creando erosione e crolli assimilabili a sinkhole. Si prevede quinid un aumento di tali fenomeni, con conseguenti danni strutturali e aumento del rischio per cose e persone. In Italia tuttavia, nei Piani per l'Assetto Idrogeologico non è generalmente contemplato il loro studio, che viene programmato solo in alcune Regioni.

Sulla base di queste considerazioni, la nostra Regione è stata chiamata a collaborare alla formazione del **Database Nazionale dei Sinkhole** dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), tramite una convenzione con il Servizio Geologico della Regione stipulata il 02.03.2015. I rilevamenti sul campo del Servizio Geologico sono dedicati allo studio e al censimento dei sinkhole in ambienti prevalentemente naturali al di fuori dei centri abitati di tutto il territorio regionale, nei quali ne sono stati identificati almeno 650, sia nelle aree montane che in quelle pianeggianti.

ARPA FVG (in particolare la Funzione Qualità dei Suoli e Biodiversità) è stata contattata dall'ISPRA per completare il censimento in corso mediante l'acquisizione di dati riguardanti sprofondamenti o voragini, superiori al metro di profondità, che si sviluppano **all'interno dei centri abitati** e prevalentemente legati a cause antropiche (*anthropogenic sinkhole*), che però i cambiamenti climatici tendono a favorire. La formazione improvvisa di tali voragini con il crollo, più o meno esteso, del manto stradale asfaltato si originano per erosione dal basso causati dalla **circolazione di acque in pressione** che causa l'erosione dei materiali sciolti e la conseguente formazione di cavità. Spesso la circolazione dell'acqua in pressione è causata da rottura di tubi di acquedotti o di reti fognarie, come nel caso dei centri abitati di Udine, Pordenone, Gorizia, Trieste.

Trieste: esplosione di un tubo dell'acquedotto e crollo della volta di un rio interrato.

A Trieste sono presenti vari **corsi d'acqua incanalati** e ricoperti con volte in mattoni risalenti all'1800 (Bonifiche Teresiane sotto l'impero A.U.), tutt'ora utilizzati anche per il drenaggio delle acque bianche. Talvolta per l'erosione dovuta a variazioni di portata, aumento del traffico pesante sovrastante (i canali sono sotto le arterie viarie), o vetustà dei materiali, le sommità delle volte cedono facendo sprofondare la sede stradale e creando situazioni di pericolo. Il collasso della rete fognaria o di drenaggio sotterranea può anche essere dovuto, come già ricordato, all'aumento della portata idrica a causa dell'aumento dei fenomeni metereologici estremi.

Al momento ARPA FVG ha censito 13 di questi casi in ambito urbano, ma purtroppo il numero è destinato sicuramente a crescere.

2.5 Ecosistemi terrestri

Il clima è uno dei fattori che influiscono maggiormente sui sistemi naturali, determinandone la composizione, la produttività, la struttura e la funzione. I **cambiamenti climatici** in atto stanno quindi influenzando in modo decisivo sia la biodiversità sia i processi ecosistemici degli ambienti terrestri.

Le emissioni di gas serra e i conseguenti cambiamenti climatici globali possono modificare **direttamente** (tramite la modificazione dei cicli biogeochimici e l'aumento della temperatura) o **indirettamente** (mediati da fattori fisici e chimici o da interazioni biologiche interspecifiche) gli ecosistemi terrestri, gli individui e le popolazioni che li abitano.

Le specie possono rispondere a tali variazioni sostanzialmente secondo tre modalità:

1) **adattandosi** alle nuove condizioni, ad esempio attraverso lo spostamento nel tempo delle fasi del ciclo vitale;

2) **migrando**, in altre parole spostandosi verso latitudini o quote dove le condizioni sono ancora adeguate o lo sono diventate;

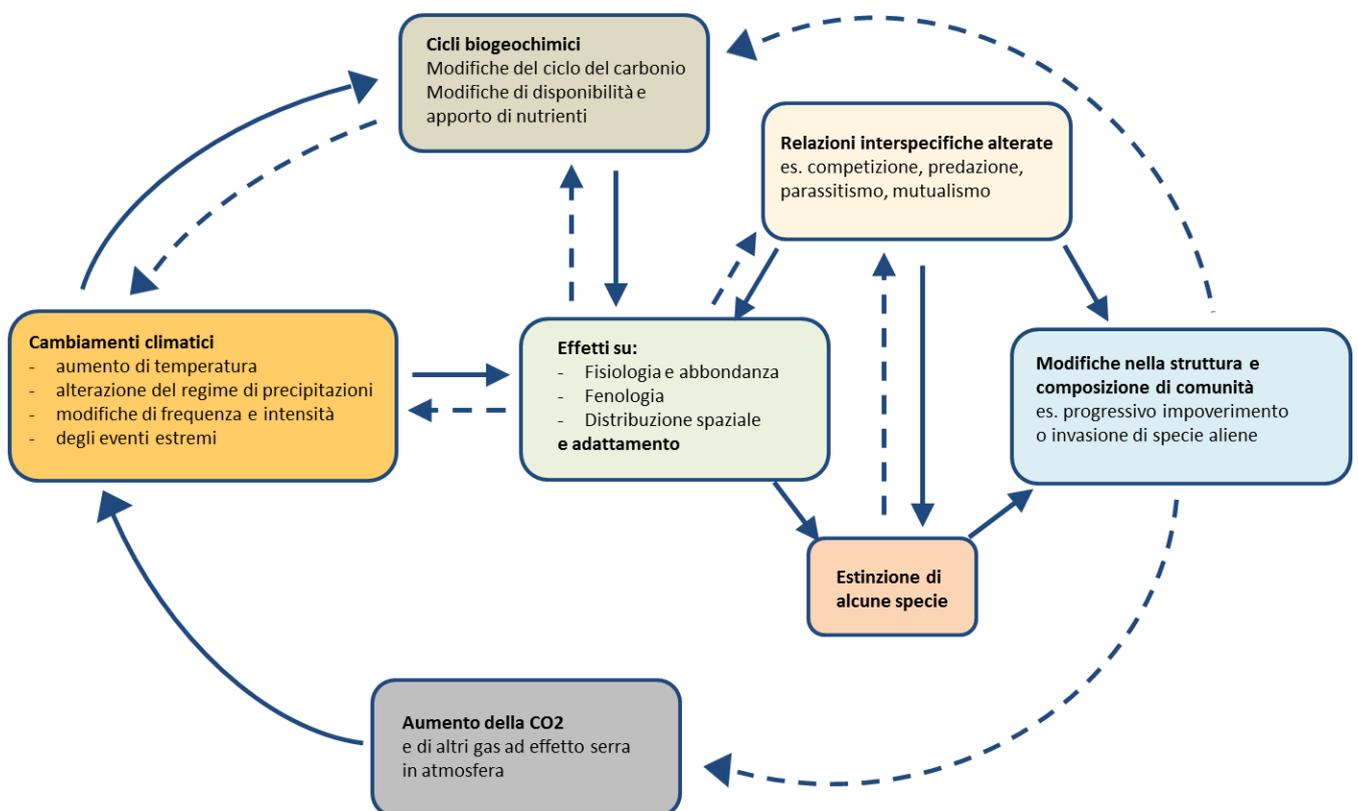
3) quando invece il cambiamento ambientale è repentino e/o si prolunga nel tempo tanto da non permettere un adattamento o una migrazione, si può verificare **l'estinzione** locale o, nel caso di cambiamenti su tutto l'areale di distribuzione, l'estinzione globale della specie.

Tipico ambiente alpino, particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici

Tralasciando i processi che avvengono su tempi molto lunghi e che spesso determinano adattamenti evolutivi a livello di singole specie, quali la selezione di genotipi meglio adattati alle variate condizioni ambientali, gli effetti dei cambiamenti climatici a breve termine su specie ed comunità ecologiche comprendono:

- Impatti sulla fisiologia, produttività e abbondanza e sul comportamento,
- Impatti sul ciclo vitale (fenologia),
- Impatti sulla distribuzione geografica,
- Impatti sulla composizione e sulle interazioni delle specie nelle comunità ecologiche.

Spesso, come risultato di questi impatti, e sopratutto delle interazioni che possono generarsi dalle singole risposte specifiche, si può assistere ad una riduzione della biodiversità e al deterioramento o alla perdita di interi habitat ed ecosistemi. La fig. 2.5.1 dà un'idea delle complesse interrelazioni tra questi fenomeni.

figura 2.5.1 – potenziali percorsi causali attraverso cui i cambiamenti climatici possono modificare una comunità ecologica terrestre; le linee tratteggiate rappresentano le principali retroazioni (rielaborato da MATTM, 2015)

Anche gli ambienti lagunari sono molto vulnerabili ai cambiamenti climatici

Gli impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi sono più rilevanti di quanto si potrebbe immaginare se pensassimo alla "natura" come ad un ambito marginale e con scarse connessioni rispetto alla sfera socio-economica: essi si riflettono infatti sui "servizi ecosistemici",ossia i contributi diretti ed indiretti degli ecosistemi al benessere umano, a cui è dedicato un approfondimento nel focus *"I Servizi Ecosistemici e la loro valutazione economica"*.

Un'altra relazione importante è quella tra cambiamenti climatici e diffusione delle specie provenienti da altre are geografiche, che possono mettere a rischio la presenza di specie native alterando gli ecosistemi: a queste problematiche è dedicato il focus *"Cambiamenti climatici e specie aliene invasive"*.

Esistono inoltre studi e progetti internazionali (es. www.atopica.eu) che stanno indagando la relazione tra i cambiamenti climatici, la diffusione di specie vegetali infestanti come l'ambrosia (*Ambrosia artemisiifolia L.*) e le allergie da polline: in Friuli Venezia Giulia è attualmente difficile individuare correlazioni tra questi fenomeni, poiché la relazione tra temperature, fioriture e produzione di pollini negli ultimi anni è stata influenzata anche da altri fattori quali la diffusione di insetti parassiti, come evidenziato nel focus su "*I pollini di Ambrosia in relazione ai cambiamenti climatici*".

Più in generale, agli andamenti della produzione di polline di diverse specie arboree in relazione alle temperature è dedicato il focus *"Pollini primaverili-estivi e conseguenze di inverni sempre più miti"*.

La tabella 2.5.1 riepiloga i vari impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi terrestri, descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tabella 2.5.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi terrestri descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					singoli IMPATTI specifici	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Fisiologia e comporta_ mento	Ciclo vitale (fenologia)	Distribuzione geografica	Composizione comunità ecologiche e interazioni tra specie	Habitat, biodiversità, cicli biogeochimici			
X					**Aumento di alcune patologie vegetali e animali**	Fauna e flora più vulnerabili alle patologie, arrivo di nuovi agenti patogeni, aumento del tasso di proliferazione e della stagione di attività per l'anticipo primaverile, riduzione della mortalità dei vettori biologici di trasmissione per l'aumento delle temperature minime in inverno e nelle ore notturne, spostamento dei serbatoi biologici delle zecche (roditori, ungulati alpini ma anche animali da pascolo) verso quote più elevate in montagna e latitudini più alte	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni
X				X	**Modifiche dei flussi di anidride carbonica**	Alterazioni della capacità di piante e suolo di assorbire CO_2, alterazione delle caratteristiche pedologiche e del tasso di respirazione eterotrofa ipogea, modificazioni e riduzione della copertura vegetale	Aumento di temperatura e diminuzione delle precipitazioni estive
X			X		**Variazioni produzione primaria, composizione floristica, riproduzione vegetale in ambienti alpini**	Nelle regioni alpine, soprattutto in ambienti particolarmente sensibili come le vallette nivali, il riscaldamento globale condiziona non solo la produzione di biomassa, ma anche la ricchezza di specie e la performance riproduttiva e, nel lungo termine, potrebbe determinare un cambiamento delle strategie riproduttive degli organismi vegetali; gli effetti dell'anticipo della fusione nivale potrebbero anche essere positivi per alcune specie, perché permetterebbero un allungamento della stagione vegetativa	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni
X					**Variazioni di crescita e metabolismo delle piante in ambito mediterraneo**	Il riscaldamento induce variazioni dei tassi di fotosintesi, perdite respiratorie di CO_2 e incremento della fotorespirazione; lo stress idrico, soprattutto quando abbinato alla siccità, produce effetti complessi sul metabolismo, tra i quali la chiusura degli stomi, con conseguente riduzione del tasso di fotosintesi netta e quindi di crescita.	Aumento di temperatura e diminuzione delle precipitazioni estive

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					singoli IMPATTI specifici	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Fisiologia e comporta_ mento	Ciclo vitale (fenologia)	Distribuzione geografica	Composizione comunità ecologiche e interazioni tra specie	Habitat, biodiversità, cicli biogeochimici			
X					**Danni da ozono alle piante**	Riduzione delle difese antiossidative delle piante, diminuzione delle risorse per la crescita vegetativa e conseguente calo della produttività primaria, riduzione dell'assorbimento di CO_2, senescenza precoce, e calo della riproduzione (il processo di formazione di O_3 troposferico sarà molto probabilmente potenziato nei prossimi anni dalle alte temperature, da un maggior indice d'irraggiamento solare e da periodi di scarse precipitazioni, legati ai cambiamenti climatici)	Aumento di temperatura e diminuzione delle precipitazioni estive
X					**Variazioni nella dinamica delle popolazioni animali**	Le alterazioni di fisiologia, produttività e sopravvivenza di tutte o alcune classi d'età, indotte dai cambiamenti climatici, possono influenzare la dinamica di popolazione	Aumento delle temperature
					Variazioni del successo riproduttivo di specie faunistiche alpine	In ambiente alpino il successo riproduttivo può essere influenzato da eventi meteorologici estremi, come ad es. per il fagiano di monte (Tetrao tetrix). Le popolazioni di ungulati che vivono ad alta quota, come lo stambecco (Capra ibex), possono risentire dei cambiamenti climatici in modo diretto o indiretto: precipitazioni nevose superiori o inferiori a determinate soglie sembrano ridurre il successo dello svezzamento e la sopravvivenza dei piccoli.	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni, eventi estremi
X					**Modificazione del periodo di latenza invernale (ibernazione) negli animali**	Il peggioramento delle condizioni corporee alla fine degli inverni più miti, probabilmente perché durante questi inverni gli individui non arrestano completamente il metabolismo e continuano a consumare le riserve di grasso	Aumento delle temperature in inverno
X					**Alterazioni della fisiologia o del comportamento negli insetti**	Eventi climatici estremi possono determinare un'alterazione della fisiologia o del comportamento negli insetti. Es. in alcune aree dell'Italia settentrionale si sono registrate massicce invasioni estive degli edifici da parte della cimice dell'olmo (Arocatus melanocephalus), in parte determinate dalla disponibilità delle piante ospite e in parte dal clima: l'intensità di tali fenomeni è, infatti, positivamente correlata con la temperatura	Aumento delle temperature, eventi estremi

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					singoli IMPATTI specifici	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Fisiologia e comporta_ mento	Ciclo vitale (fenologia)	Distribuzione geografica	Composizione comunità ecologiche e interazioni tra specie	Habitat, biodiversità, cicli biogeochimici			
	X				**Anticipazione di fasi riproduttive e dello sviluppo negli animali**	Ad esempio molti anfibi anticipano il periodo della riproduzione (anche di settimane) con possibile sfasamento rispetto alla disponibilità di acqua necessaria per la riproduzione; molti insetti anticipano lo stadio alato.	Aumento delle temperature
	X		X		**Alterazioni delle fenofasi nelle piante**	Anticipazione del periodo di fioritura di molte piante; germinazione dei semi in autunno anziché in primavera e quindi sviluppo della plantula in una stagione con condizioni climatiche avverse che possono compromettere la sopravvivenza dei germogli; alterazione dell'abilità competitiva e della capacità di sincronizzarsi con specie ecologicamente correlate, con impatti sulla struttura e il funzionamento degli ecosistemi sia in termini di successo riproduttivo per le piante, sia di disponibilità di risorse per le specie animali Aumentare o diminuire la quantità di polline prodotta.	Aumento delle temperature
X	X	X			**Cambiamento degli eventi migratori degli uccelli con possibili effetti sulla riproduzione**	Le variazioni delle tempistica delle migrazioni interessano in particolare l'avifauna, con modalità ed effetti diversi che possono interessare migratori a lungo o a corto raggio e le condizioni di riproduzione o di svernamento, con possibili conseguenti sfasamenti rispetto alla disponibilità di risorse alimentari e conseguenze sul successo riproduttivo. Es. con l'aumento delle temperature primaverili nelle aree temperate si verifica un anticipo negli arrivi degli uccelli ai quartieri riproduttivi, maggiore per le specie migratrici a corto raggio. Anche le farfalle mostrano una forte correlazione tra date di prima apparizione e temperature primaverili.	Aumento delle temperature
	X		X		**Sfasamento tra i cicli vitali di popolazioni ecologicamente interconnesse**	Se le specie rispondono diversamente alle variazioni climatiche, avviene la rottura delle interazioni, quali preda-predatore o ospite-parassita, e un'alterazione dell'ecosistema	Aumento delle temperature

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					singoli IMPATTI specifici	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Fisiologia e comporta_ mento	Ciclo vitale (fenologia)	Distribuzione geografica	Composizione comunità ecologiche e interazioni tra specie	Habitat, biodiversità, cicli biogeochimici			
		X			**Modifiche degli areali di svernamento degli uccelli**	Cambiamenti delle zone in cui gli uccelli trovano le condizioni adatte per trascorrere l'invero con possibili conseguenze su dinamiche e consistenza delle popolazioni	Aumento delle temperature
		X			**Risalita di quota delle specie vegetali della fascia montana**	Migrazione verso quote superiori sia di specie alpine che di specie arbustive; risalita di specie arboree con conseguente innalzamento dei limiti della vegetazione arborea	Aumento delle temperature
		X	X	X	**Modifiche delle comunità vegetali nella regione alpina**	Variazione di composizione floristica, estensione e pattern di distribuzione delle comunità vegetali, dinamismo e processi di colonizzazione delle specie; "termofilizzazione" delle vegetazioni di quota; conseguenti perdita di biodiversità e maggiore rischio di estinzione per molte specie	Aumento delle temperature
		X			**Spostamento in alta quota di specie animali montane**	Riduzione e frammentazione dei loro areali e aumento del rischio di estinzione locale, aumento della vulnerabilità ad eventi disastrosi per le popolazioni sempre più ridotte e riproduttivamente isolate	Aumento delle temperature
		X		X	**Alterazione e perdita di habitat nelle zone umide costiere**	Aumento della vulnerabilità dei stagni temporanei per la variazione del regime di precipitazione e l'incremento della siccità, con impatti sulla distribuzione e fisionomia della vegetazione; l'incremento del livello del mare potrebbe provocare la riduzione e l'alterazione degli habitat di lagune salmastre costiere, zone umide, aree riparie e con vegetazione alofita.	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni, aumento del livello del mare
		X			**Spostamento e contrazione degli areali idonei alla vita di rettili e anfibi, con ripercussioni sulle popolazioni**	Modifiche delle aree di colonizzazione degli anfibi in modo così marcato e rapido da rendere impraticabile un loro adattamento a causa della loro bassa capacità di dispersione	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					singoli IMPATTI specifici	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Fisiologia e comporta_ mento	Ciclo vitale (fenologia)	Distribuzione geografica	Composizione comunità ecologiche e interazioni tra specie	Habitat, biodiversità, cicli biogeochimici			
		X	X		**Diffusione di specie vegetali aliene/invasive termofile con modifiche delle comunità ecologiche**	Diffusione di specie vegetali aliene/invasive termofile (es. Amorpha fruticosa) con sostituzione di specie autoctone e alterazione delle comunità vegetali, delle interazioni tra specie, dei cicli biogeochimici e del paesaggio	Aumento delle temperature
		X	X		**Maggiore diffusione e/o abbondanza di insetti infestanti o vettori di patologie**	Maggiore proliferazione ed espansione territoriale di insetti infestanti o vettori la cui diffusione finora era controllata da certe condizioni climatiche. Es. ampliamento dell'areale e schiusa anticipata dei nidi della Processionaria del pino (Thaumetopoea pityocampa) con conseguenti maggiori danni agli alberi e rischi per la salute umana.	Aumento delle temperature
		X	X		**Maggiore diffusione e/o abbondanza di specie vegetali aliene allergeniche**	Diffusione e variazione della stagione pollinica di specie aliene allergeniche (es. Ambrosia artemisifolia), con conseguenze su salute oltre che su comunità vegetali e paesaggio	Aumento delle temperature
		X	X		**Cambiamenti degli areali e della distribuzione di specie faunistiche termofile/mediterranee**	Risalita verso maggiori altitudini o latitudini di animali tipici di climi caldi	Aumento delle temperature
			X	X	**Alterazioni delle torbiere alte attive**	Modifiche nell'estensione, nella composizione delle comunità ecologiche e nelle caratteristiche fisico-chimiche delle torbiere di alta quota	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni
			X	X	**Alterazioni della qualità biologica del suolo**	Variazioni degli indici QBS-ar, QBS-c e nei gruppi sistematici di organismi indicatori	Aumento di temperatura, variazioni del regime delle precipitazioni

I cambiamenti climatici e le emissioni di gas serra agiscono negativamente in **sinergia con altri *driver* di cambiamento globale e locale**, come la frammentazione e degradazione degli habitat, l'invasione di specie aliene, l'inquinamento e i cambiamenti di uso del suolo. Nell'insieme, queste saranno le principali cause della perdita della biodiversità in ambiente terrestre con importanti ricadute non solo in ambito ecologico, ma anche economico e sociale, a causa ad esempio del peggioramento della qualità delle acque, del declino degli impollinatori, dell'aumento del rischio idrogeologico e del degrado del suolo.

La **scala temporale** con cui i cambiamenti climatici possono modificare un ecosistema può variare dai giorni, per l'attività microbica nel suolo, all'anno, per il flusso di carbonio nell'ecosistema, alle decine di anni, per la modifica della composizione di una comunità, alle centinaia o addirittura migliaia di anni, nel caso dell'adattamento ed evoluzione di una o più specie o cenosi vegetali.

Le zone alpine e appenniniche di alta quota e **la regione biogeografica mediterranea,** sono le aree a maggior rischio di perdita di biodiversità che, ad oggi, hanno subito gli impatti più evidenti. I siti di alta quota, soprattutto nelle Alpi, sono caratterizzati da un ridotto impatto antropico, perciò in questo contesto le variazioni della componente vegetale che si osservano possono essere facilmente studiate in funzione della variabilità climatica, essendo l'influenza di altri driver estremamente ridotta; in questi ecosistemi le specie presentano adattamenti a condizioni estreme e risultano particolarmente sensibili all'effetto dei fattori climatici. Differente è invece la situazione per l'area mediterranea, dove da millenni l'ambiente è modellato e plasmato dall'attività antropica che concorre, quindi, con i cambiamenti climatici a definire la tipologia e l'entità degli impatti.

Il **Friuli Venezia Giulia**, collocandosi a cavallo delle due regioni biogeografiche mediterranea e alpina, è e sarà interessato in maniera rilevante dagli impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi e sulla biodiversità. Data la grande varietà di climi locali, habitat, comunità e specie animali e vegetali, sarà opportuno analizzare la rilevanza dei diversi impatti in riferimento ai diversi contesti specifici, tramite successivi approfondimenti e confronti con esperti specialisti dei diversi settori coinvolti.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 SNACC, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015– pag. 30-31*
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 182-211*
- *PNACC – Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali (versione di Luglio 2017) – pag. 125-133*

Vedi anche i casi studio:

3.9 *Impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste: eventi di disseccamento e mortalità degli alberi a seguito di episodi di aridità*

3.10 *Relazioni tra la crescita degli arbusti-nani e la diversità vegetale ad alta quota: evidenze degli effetti indiretti del riscaldamento climatico nella tundra alpina*

FOCUS Cambiamenti climatici e specie aliene invasive

Giovanni Bacaro, Enrico Tordoni, Luca Scoria, Università di Trieste
Anna Carpanelli, Regione autonoma Friuli Venezia Giulia Direzione generale Servizio paesaggio e biodiversità,
Marco Valecic, Regione autonoma Friuli Venezia Giulia ERSA Servizio fitosanitario e chimico, ricerca, sperimentazione e assistenza tecnica.

Ambrosia artemisiifolia L.

La perdita di biodiversità ha assunto un ruolo chiave negli ultimi decenni nella ricerca scientifica (Sala et al. 2000); molti studi hanno dimostrato che questi cambiamenti alterano i processi ecosistemici modificandone persino la loro capacità di riprendersi a seguito di un disturbo (resilienza). Scienziati e policy maker sono attualmente impegnati a cercare di comprendere le conseguenze che le alterazioni antropiche possono causare agli ecosistemi ed ai servizi ecosistemici ad essi correlati. Ad oggi, gli effetti dei cambiamenti climatici sula biodiversità non sono totalmente noti dato che le scale temporali su cui agiscono questi fenomeni sono generalmente piuttosto ampie. Tuttavia, ci si aspetta che i cambiamenti climatici possano avere pesanti ripercussioni sulla biodiversità modificando fenologia, composizione genetica ed areali delle specie, alterando anche le loro interazioni biotiche ed i processi ecosistemici (Hellmann et al. 2008); è stato stimato che i cambiamenti globali attualmente in atto hanno compromesso fino al 60% dei servizi ecosistemici presenti sul nostro pianeta (MEA 2005). In ecologia è ben noto che la distribuzione delle specie è fortemente controllata da una serie di variabili ambientali. Tra queste, quelle climatiche come la temperatura e le precipitazioni svolgono un ruolo chiave nel delimitare sia l'areale di distribuzione di una specie che la nicchia ecologica, in special modo a grandi scale spaziali come quella regionale o continentale. Alcune simulazioni sembrano suggerire che i cambiamenti climatici potrebbero portare fino alla scomparsa, entro il 2100, di più del 50% delle specie vegetali europee attualmente a rischio (Thuiller et al. 2005). Spesso i cambiamenti climatici sono stati annoverati tra i principali fattori di degrado e causa della perdita degli ecosistemi, in altri casi essi accentuano ed aggravano gli impatti di fattori di origine antropica come inquinamento, consumo di suolo, eccessivo prelievo di risorse naturali, deforestazione, riduzione e frammentazione degli habitat e diffusione di specie aliene (specie la cui distribuzione in una data area è il risultato di un'introduzione antropica intenzionale o accidentale). Queste ultime e, in particolare, quelle ritenute invasive sono tra le principali minacce alla biodiversità globale. L'intensità e la frequenza del fenomeno a scala globale ha raggiunto livelli difficilmente calcolabili, ma lo squilibrio dei flussi di immigrazione ed emigrazione di specie per alcuni ecosistemi ha raggiunto una dimensione realmente significativa: l'ecosistema unico al mondo delle Isole Galapagos, considerabile come quasi completamente isolato, negli ultimi 20 anni ha conosciuto un incremento esponenziale del tasso medio di immigrazione tale da raggiungere valori 100.000 volte superiori rispetto al valore medio calcolato per gli ultimi 3 milioni di anni (Pyšek e Richardson 2008). In Europa,

il numero di specie aliene invasive è cresciuto del 76% negli ultimi 30 anni provocando danni stimati per circa 12 miliardi di euro all'anno.

In termini generali, con il termine "invasioni biologiche" si identificano quei fenomeni e processi che determinano il trasporto, intenzionale o meno, da parte dell'uomo di organismi in aree che tali taxa non potrebbero raggiungere a causa dei limiti posti dai propri meccanismi di dispersione e dalle barriere biogeografiche (Carlton 2001; Mack et al. 2000). Per specie alloctone, o aliene, si intendono quindi specie che hanno superato i limiti dei loro range geografici naturali e che sono state in grado di stabilire popolazioni stabili nei nuovi ambienti (Blackburn et al. 2011). La veicolazione antropica rende possibili introduzioni altamente improbabili per cause naturali oppure che le invasioni biologiche siano caratterizzate da dinamiche spazio-temporali molto rapide, decisamente superiori a quelle delle migrazioni naturali.

Con il termine "*invasiveness*" viene identificata la predisposizione da parte di una specie a diventare invasiva (Alpert et al. 2000; Rejmánek e Richardson 1996). La predisposizione ad assumere carattere invasivo da parte di una specie dipende da un insieme di fattori che condizionano principalmente la sua capacità di dispersione (Alpert et al. 2000). Diverse ricerche identificano questa capacità come legata a tratti peculiari intrinseci e caratteristici delle specie quali la durata delle generazioni, la durata del periodo riproduttivo e la capacità di dispersione dei propaguli, legata anche alla loro dimensione e al loro numero (Alpert et al. 2000; Rejmánek e Richardson 1996). La capacità di una specie di stabilire ed ampliare le proprie popolazioni dipende significativamente anche dai fattori biotici e abiotici del sito di introduzione che determinano le condizioni ambientali alle quali la specie deve far fronte e perciò dalle opportunità che le comunità e l'ambiente interessati forniscono (Alpert et al. 2000; Blackburn et al. 2011; Davis et al. 2005; Levine 2008; Richardson et al. 2000; Shea e Chesson 2002).

Blackburn et al. (2011) hanno descritto un modello teorico per l'interpretazione delle dinamiche invasive, suddividendo il processo di invasione in una serie di fasi dipendenti dal superamento di determinate barriere. La prima fase del processo di invasione è rappresentata dal trasporto della specie e dall'introduzione in un nuovo habitat. A questa prima barriera geografica, principio del modello proposto da Richardson et al. (2000), Blackburn et al. (2011) associano un'ulteriore barriera (Captivity or Cultivation) che enfatizza il legame tra introduzioni di specie alloctone e trasporto umano, più o meno volontario, e che sottolinea soprattutto il fatto che molte specie vegetali (e animali) che vengono coltivate (o mantenute in cattività) non hanno la capacità di proliferare naturalmente al di fuori di queste condizioni controllate dall'uomo. Qualora le specie riescano ad oltrepassare tale limite, il passo successivo è rappresentato dalla sopravvivenza degli individui nei nuovi ambienti e dalla stabilizzazione di una popolazione tramite la formazione di nuove generazioni di individui. In questa fase del processo di invasione, quella che è stata definita da Richardson et al. (2000) come "barriera ambientale" viene denominata "Survival barrier" (o barriera di sopravvivenza) che non può essere considerata separatamente dalla barriera della riproduzione ("Reproduction barrier"), sottolineando il fatto che la stabilizzazione di una specie alloctona in un nuovo ambiente dipenderà innanzitutto dalla sopravvivenza dei suoi individui e dal suo successo riproduttivo (Blackburn et al. 2011). In questa fase la specie viene ancora definita "Casuale" (o non-naturalizzata) e, nel caso di organismi vegetali, si tratta di una specie per la quale gli individui sopravvissuti riescono a portare a termine il ciclo vitale, fino alla produzione dei semi, ma non sono in grado di formare una popolazione stabile (Richardson e Pyšek 2006). Una specie viene considerata come "Naturalizzata" quando, al contrario, forma popolazioni in grado di autosostenersi per almeno 10 anni (nel caso di specie vegetali, tramite semi o per via vegetativa), senza l'intervento dell'uomo (Blackburn et al. 2011; Richardson et al. 2000; Richardson e Pyšek 2006). Le specie che mostrano la capacità di diffondersi massivamente anche a distanze significative rispetto al luogo di introduzione sono definite "Invasive". Normalmente, solo una percentuale minima delle specie naturalizzate diventa effettivamente invasiva (Richardson e Pyšek 2006). Tale percentuale fa riferimento alla "regola del 10" proposta da Williamson e Brown (1986), che

fornisce una stima quantitativa della proporzione delle specie in grado di diventare invasive in seguito all'introduzione. Secondo questa regola, solamente il 10% delle specie introdotte sarà in grado di assumere il carattere di specie casuale; di queste solo il 10% riuscirà a naturalizzarsi nei nuovi ambienti ed infine, solamente un decimo di queste manifesterà caratteristiche invasive (Richardson e Pyšek 2006). In base a questa regola, perciò, la probabilità di invasione riguarda solamente l'1% delle specie aliene casuali. I tratti che contribuiscono al successo di una specie non sono universali, ma vanno correlati alle condizioni geografiche, e ad un set di fattori esterni, come:

1. Fattori stocastici, quali la dimensione iniziale della popolazione degli individui introdotti (definita come "pressione dei propaguli") ed il numero dei tentativi di introduzione (Pyšek et al. 2004; Rejmánek et al. 2005) oltre agli eventi climatici estremi;

2. Il tempo di residenza ("residence time") di una specie in un determinato sito, fattore che può incrementare le probabilità di naturalizzarsi. Maggiore sarà il tempo di residenza, maggiori risulteranno la pressione dei propaguli nell'area e la probabilità che questi costituiscano la base per nuove popolazioni stabili in spazi sempre più ampi (Pyšek et al. 2004; Richardson e Pyšek 2006).

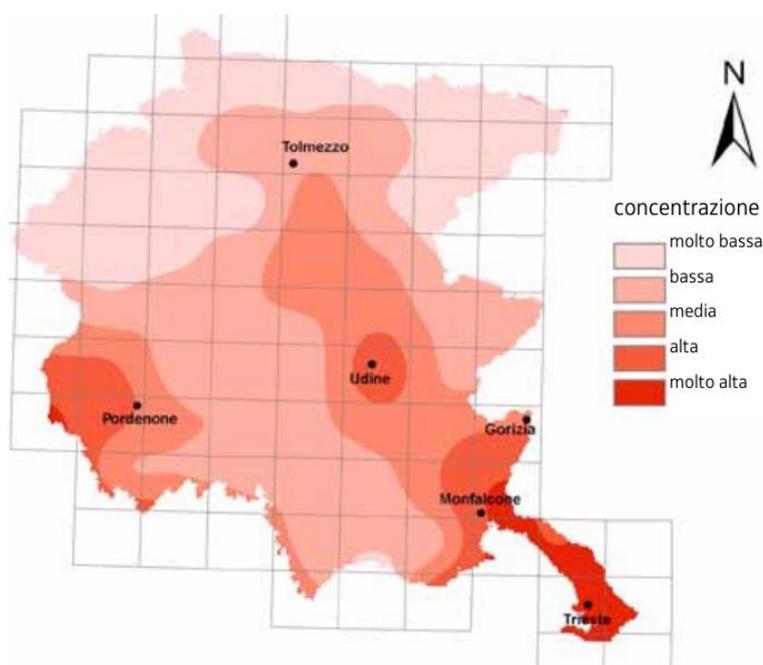
L'arco temporale immediatamente successivo all'introduzione viene definito come "periodo di latenza" durante il quale la specie mette in atto i propri meccanismi adattativi per insediarsi nei nuovi habitat, e può avere durata dell'arco di decine di anni. È durante la fase di latenza che le barriere della sopravvivenza e del successo riproduttivo determinano la capacità di una specie aliena di diventare naturalizzata e potenzialmente invasiva. In seguito all'uscita dalla fase di latenza, il processo di invasione incontra la fase dello "Spread", ossia della diffusione della popolazione oltre i limiti del luogo di introduzione, che porta i propaguli a raggiungere e proliferare in nuovi siti (Blackburn et al. 2011; Levine, 2008; Richardson et al. 2000). In questa fase, il processo invasivo può ancora andare incontro al fallimento poiché numerosi sono i casi in cui in seguito alla fase della diffusione si è verificata una sorta di implosione della popolazione alloctona fino alla rapida estinzione: questo fenomeno prende il nome di "Boom and Bust", traducibile come "Esplosione e Fallimento" (Blacknurn et al. 2011). Qualora invece la specie riesca a stabilire popolazioni stabili anche in nuovi habitat, caratterizzati da nuove condizioni ambientali, il processo invasivo può essere considerato ultimato ed è dunque possibile attribuire alla specie il carattere invasivo anche a prescindere dall'impatto che questa possa avere sull'ambiente e sulle comunità invase (Blackburn et al. 2011; Richardson et al. 2000).

In Europa sono state stimate circa 12100 specie aliene, delle quali approssimativamente il 12% è ritenuto invasivo. Circa il 77% delle specie aliene presenti in Europa è costituito da piante e invertebrati terrestri; i principali vettori d'introduzione vengono considerati i trasporti, insieme all'introduzione a scopi commerciali, al rilascio intenzionale in natura e alla dispersione casuale. Sebbene alcuni studi sembrano indicare un possibile ruolo "facilitatore" dei cambiamenti climatici nella diffusione di specie aliene invasive, quest'argomento è ancora oggetto di dibattito in ambito accademico. E' stato comunque osservato in diverse ricerche, soprattutto in ambiente montano, come le temperature medie relative al periodo primaverile siano generalmente legate al limite altitudinale di diffusione delle specie aliene vegetali (Barni et al. 2012, Bacaro et al. 2015), determinando in questo modo una chiara relazione causa-effetto che, relativamente ai cambiamenti climatici, è utile a prevedere una maggiore distribuzione delle specie aliene in funzione dell'innalzamento delle temperature, con impatti sensibili sulla biodiversità.

Generalmente però le specie aliene invasive sono quelle che occupano vasti areali geografici e nicchie climatiche molto ampie che gli garantiscono la sopravvivenza a diverse condizioni climatiche. Inoltre sono spesso dotate di caratteristiche fisiologiche che gli consentono di sopportare rapidi mutamenti nell'areale di distribuzione come, ad esempio, maturità sessuale precoce, cicli vitali ridotti e facilità di dispersione dei propaguli (semi ed altri organi di propagazione; Qian & Ricklefs 2006).

Specie aliene vegetali in Friuli Venezia Giulia

Il tasso d'invasione nella flora italiana è stato stimato attorno al 13,4 %, quello calcolato per la Regione Friuli Venezia Giulia si attesta circa al 11,6% (331 specie aliene su 2859 specie della flora regionale, Poldini et al. 2001). Di queste, le specie vegetali esotiche invasive, riportate nelle liste nazionali ufficiali (Flora vascolare alloctona e invasiva delle regioni d'Italia, 2009), sono 37.

Figura 1: Carta della distribuzione delle specie aliene in Friuli Venezia Giulia con indicazione delle aree a densità maggiore (da Carpanelli e Valecic 2016, precedentemente modificata da Poldini, 2009, Poldini et al., 2010)

La famiglia con il maggior numero di specie aliene è quella delle *Asteraceaea*. La maggior parte delle specie aliene presenti sul territorio regionale ha origine americana ed eurasiatica, seguite da specie di origine africana e del bacino del Mediterraneo. Le tipologie di habitat più invase risultano essere quelli più antropizzati come le superfici artificiali (matrici urbane) e le zone agricole. Data l'intensa urbanizzazione e la fitta rete viaria, soprattutto nella fascia planiziale, questa può essere considerata dal punto di vista funzionale come un'estesa area metropolitana (Celesti-Grapow et al. 2010). Inoltre nella fascia climaticamente più calda della regione molte specie invasive, di origine neo-tropicali, trovano l'habitat ideale. Infine, la loro diffusione è favorita dalla presenza di aree portuali che, come è ben noto dalla letteratura, rappresentano spesso il primo punto d'ingresso di nuove specie aliene (Tordoni et al. 2017). Per queste ragioni un aumento delle temperature potrebbe provocare la genesi di nuove nicchie ecologiche ed habitat ideali alla diffusione di queste specie.

Le conseguenze di queste invasioni sono di ordine ecologico-paesaggistico, sanitario, produttivo e quindi, in ultima analisi, economico. Le specie aliene invasive, in sostanza, possono incidere significativamente nel destabilizzare la struttura che garantisce il benessere umano. Alcune di queste infatti come, ad esempio, *Ambrosia artemiisifolia* L.

possiedono un polline estremamente allergenico. Altre come *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle possono apportare bio-deterioramento ai manufatti antropici come monumenti e reperti archeologici dovuto a danni meccanici e chimici causati dall'apparato radicale. Altre ancora possono generare danni alle colture agricole con conseguente riduzione e/o perdita della produttività. Infine, le specie aliene, possono ridurre la diversità nelle comunità residenti competendo con le specie native per le risorse e semplificandone gli ecosistemi causando anche la perdita di servizi ecosistemici connessi nonché l'alterazione dell'estetica dei paesaggi.

Dato per assodato che l'eradicazione della maggior parte delle specie invasive è oramai quasi impossibile (tranne per quelle appena insediate in territorio regionale aventi popolazioni localizzate), è fondamentale attuare azioni di prevenzione, controllo e contenimento della loro diffusione nonché di ripristino ambientale, ove necessario. Tali interventi, che se fatti nelle prime fasi di sviluppo ed insediamento delle specie aliene sono molto più economici ed efficaci rispetto ad interventi tardivi, devono essere sempre seguiti dal monitoraggio per verificare l'efficacia delle azioni intraprese.

Al momento la Regione Friuli Venezia Giulia ha individuato tre classi di rischio per quanto riguarda le specie aliene: 1) specie di temuta introduzione non ancora presenti nel territorio regionale. In questo caso è basilare individuare i primi focolai e tentarne l'eradicazione fin da subito evitando la potenziale espansione della popolazione. Inoltre azioni di prevenzione sono necessarie per evitare l'ingresso di nuove specie (soprattutto in porti ed aeroporti) attraverso piani di *risk assessment* e studio delle rotte commerciali. 2) specie da poco introdotte, cioè specie presenti in piccoli nuclei, per cui si ritiene possibile l'eradicazione dal territorio con azioni mirate ad elevata intensità e frequenza; 3) specie diffuse ed insediate stabilmente in regione di cui è possibile solo il monitoraggio delle popolazioni e la gestione per contenerne la diffusione. È bene attuare misure di prevenzione al fine di limitare l'introduzione/diffusione di specie aliene tra le quali vale la pena annoverare: evitare l'utilizzo di piante aliene o loro propaguli a fini ornamentali, nei ripristini e nella vivaistica; evitare di lasciare suolo nudo in caso di cantiere e movimentazione di terra e curare la progettazione, pulizia e manutenzione dei manufatti per evitare il loro possibile insediamento. Per quel che riguarda l'eradicazione, metodi fisici/agronomici (sfalcio e mulching, pacciamatura, ecc.) assieme ad un'attenta gestione selvicolturale del territorio sarebbero da preferire rispetto alla lotta chimica.

Tale approccio è attualmente soggetto a perfezionamento in modo da ottimizzare l'utilizzo delle risorse ed informazioni disponibili.

Gli strumenti normativi di Riferimento

Al principale fine di tutelare la biodiversità e per far fronte agli ingenti danni sia economici che ecologici causati dalle specie aliene invasive, l'Unione Europea ha emanato un apposito regolamento (Regolamento UE 1143/2014 del 22/10/2014), atto a i) prevenirne l'introduzione, ii) rilevarne precocemente ed intervenire velocemente per l'eradicazione, iii) monitorarne e gestirne la diffusione all'interno dell'Unione Europea. Tale Regolamento inoltre cita i cambiamenti climatici come uno dei fattori in grado di intensificare i rischi per l'ambiente e per l'uomo provocati dalle specie invasive.

Il Regolamento prevede che i Paesi Membri attuino una serie di misure gestionali per le specie aliene invasive più dannose, che comprendono il blocco del commercio, del possesso e del trasporto, il rilascio nell'ambiente, il divieto di allevamento e riproduzione, il rilevamento precoce e la rapida rimozione, l'identificazione delle principali vie di introduzione sulle quali concentrare gli sforzi di prevenzione. Queste misure si applicano alle specie presenti in una specifica Lista di specie aliene invasive di rilevanza unionale, adottata ufficialmente nel luglio 2016 ed integrata una

prima volta nel luglio 2017 da parte della Commissione Europea. Attualmente la lista si compone di 49 specie di cui 33 già presenti in Italia.

L'Italia si è adeguata al Regolamento il 30 gennaio 2018 attraverso un apposito decreto legislativo, un nuovo strumento normativo a tutela della biodiversità. Pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale (serie generale n. 30 del 30/01/2018) il Decreto Legislativo 230 del 15 dicembre 2017, adegua la normativa italiana al Regolamento UE 1143/2014 sull'introduzione e la diffusione di specie esotiche invasive. Il decreto fa suo il punto di partenza del regolamento: le specie esotiche invasive sono una delle principali minacce alla biodiversità e ai servizi ecosistemici nonché una rilevante causa di danni economici e sulla salute umana. Il decreto introduce numerosi divieti per evitare che le specie esotiche più pericolose, contenute in apposite liste ufficiali (unionale e nazionale), siano introdotte accidentalmente o volontariamente e si diffondano sul nostro territorio; sono quindi vietati l'introduzione, la detenzione, l'allevamento e la coltivazione, il trasporto, il commercio, il rilascio nell'ambiente naturale, la cessione gratuita. Il decreto individua le autorità amministrative competenti nelle azioni di prevenzione, controllo, eradicazione, monitoraggio e sorveglianza previste dal regolamento. Il Ministero dell'Ambiente, del territorio e del mare è riconosciuto come autorità nazionale di raccordo con la Commissione Europea e di coordinamento fra le pubbliche amministrazioni; l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) è incaricato del supporto tecnico e scientifico all'attuazione del decreto. Particolare responsabilità è poi assegnata alle Regioni e alle Province Autonome, che sono tenute a monitorare permanentemente il loro territorio per rilevare la presenza e la distribuzione delle specie esotiche invasive e ad attuare interventi di eradicazione rapida o di gestione, "risparmiando agli esemplari oggetto di eradicazione dolore, angoscia, o sofferenze evitabili". Per tali interventi le autorità territoriali locali dovranno garantire, ove necessario, l'accesso ai terreni privati. Un importante passaggio del decreto è l'obbligo che le Regioni, le Province Autonome e le aree protette nazionali, a valle di interventi di eradicazione o gestione di specie esotiche invasive, adottino misure di ripristino degli ecosistemi danneggiati.

La regione Friuli Venezia Giulia, con L.R. 9/2007 (Sez. IV bis - Lotta alle specie vegetali infestanti dannose per la salute umana e per l'ambiente) ha identificato una lista di tre specie vegetali invasive dannose per la salute umana e per l'ambiente (*Ambrosia artemiisifolia* L., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle e *Senecio inaequidens* DC) per cui è concessa la lotta senza autorizzazione oltre ad attività di divulgazione atte a renderne nota la potenziale pericolosità e i danni ambientali che possono generare. Tale lista potrà essere integrata, in modo tale da poter includere, nel breve periodo, le ulteriori 34 specie invasive presenti in Friuli Venezia Giulia.

Bibliografia

- Bacaro, G. ,Maccherini, S., Chiarucci, A., Jentsch, A., Rocchini, D., Tossi, D., Gioria, M., Tordoni, E., Martellos, S., Altobelli, A., Rudinger, O., Escudero, C.G., Fernandez Lugo, S., Fernandez-Palacios, J.M., Arevalo, J.R. (2015). Distributional patterns of endemic, native and alien species along a roadside elevation gradient in Tenerife, Canary Islands. Community Ecology, 16: 223-234

- Barni, E., Bacaro, G., Rocchini, D:, Falzoi, S., Spanna, F., Siniscalco, C. (2012). Establishing climatic constraints shaping the distribution of alien plant species along the elevation gradient in the Alps. Plant Ecology, 213: 757-767.

-Carpanelli, A., Valecic, M. (2016). Specie vegetali esotiche invasive in Friuli Venezia Giulia, Riconoscimento e possibili misure di contenimento – Regione autonoma Friuli Venezia Giulia.

-Celesti-Grapow L., Pretto, F., Carli, E., Blasi, C. (2010). Flora vascolare alloctona e invasiva delle regioni d'Italia, Roma: Casa Editrice Università Sapienza.

-Hellmann, J. J., Byers, J. E., Bierwagen, B. G., Dukes, J. S. (2008). Five potential consequences of climate change for invasive species. Conservation biology 22(3): 534-543.

-MEA (2005). Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human wellbeing: a framework for assessment Washington, DC: Island Press.

- Poldini L. (2009). La diversità vegetale tra Trieste e Gorizia. Lo stato dell'Ambiente. Guide alla Flora IV, Le Guide di Dryades 5 – Serie Flore IV (F-IV), Ed. Goliardiche, 736 pp., Trieste.

Poldini L., Oriolo G., Vidali M. 2001. Vascular flora of Friuli-Venezia Giulia. An annotated catalogue and synonimic index. Studia Geobotanica 21:3-227.

- Poldini L., Vidali M. & Comin S.(2010). Friuli Venezia Giulia. In: Celesti-Grapow L., Pretto F., Carli E. & Blasi C. (Eds.), Flora vascolare alloctona e invasiva delle regioni d'Italia. Casa Editrice Università La Sapienza, pag. 61-66, Roma.

-Qian, H., Ricklefs, R. E. (2006). The role of exotic species in homogenizing the North American flora. Ecology Letters 9(12): 1293-1298.

-Sala, O. E., Chapin, F. S., Armesto, J. J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., ..., Leemans, R. (2000). Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science, 287(5459): 1770-1774.

-Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102(23): 8245-8250.

-Tordoni, E., Napolitano, R., Nimis, P., Castello, M., Altobelli, A., Da Re, D., Zago, S., Chines, A., Martellos, S., Maccherini, S., Bacaro, G. (2017). Diversity patterns of alien and native plant species in Trieste port area: exploring the role of urban habitats in biodiversity conservation. Urban Ecosystems 20: 1151–1160.

FOCUS Come monitorare gli impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi alpini: l'esempio del progetto Climaparks

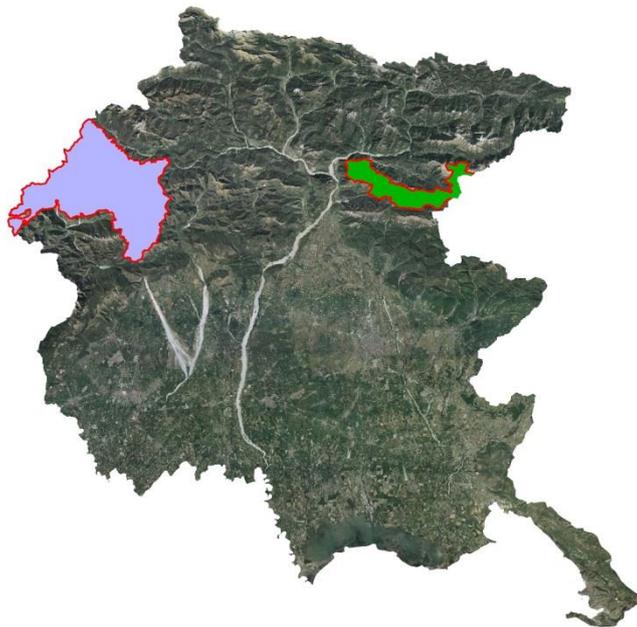
Massimo Buccheri, Paolo Glerean - Museo Friulano di Storia Naturale, Udine

Habitat alpino particolarmente vulnerabile al cambiamento climatico: valletta nivale sul Monte Canin

Nel corso della storia del nostro pianeta sono avvenuti più volte significativi cambiamenti delle condizioni climatiche, ai quali gli organismi hanno risposto nell'arco della loro storia evolutiva. Anche i recenti cambiamenti climatici (relativi al XX secolo) hanno già prodotto impatti evidenti a livello globale, con conseguenze su un ampio range di specie animali e vegetali, di ambienti terrestri, marini e di acque dolci, in un vasto raggio di distribuzione geografica, dalle regioni polari a quelle tropicali ed equatoriali (Walther et al., 2002; Root et al., 2003; Parmesan e Hohe, 2003; Wookey et al., 2009). Molte specie hanno infatti mostrato variazioni di distribuzione sia latitudinale che altitudinale, con spostamenti verso le aree polari o verso quote superiori, variazioni di abbondanza, di fenologia (specialmente con un anticipo primaverile delle fasi di sviluppo e/o migrazione e spesso con un ritardo della senescenza autunnale), alterazioni delle modalità di interazione interspecifica (es. preda-predatore), invasione di specie aliene (anche da orizzonti altitudinali inferiori), variazioni della composizione delle comunità vegetali (Hughes,

2000; Chapin et al., 2005). Si è inoltre notato che gli impatti più significativi riguardano le aree polari e quelle di alta quota (IPCC, 2007), nei quali sono stati osservati cambiamenti della distribuzione delle specie con la latitudine (Chapin et al., 2005), la quota (Lenoir et al., 2008) ed anche variazioni areali della disposizione spaziale delle comunità vegetali (Cannone et al., 2007).

La vegetazione di alta quota è considerata altamente sensibile e vulnerabile ai cambiamenti climatici a lungo termine (Theurillat e Guisan, 2001) tanto che negli ultimi 50 anni si è registrato l'innalzamento di 120-340 m dei limiti di distribuzione di specie legnose ed arbustive (Kullman, 2002), la migrazione altitudinale di piante dell'orizzonte alpino e nivale (Walther et al., 2005; Pauli et al., 2007), e sostanziali cambiamenti della composizione di comunità vegetali entro quadrati permanenti di monitoraggio (Keller et al., 2005; Bahn e Körner, 2003; Pauli et al., 2007). Sulle Alpi centrali Italiane si è osservata una forte espansione della vegetazione arbustiva, con una migrazione di circa 200 metri verso quote superiori, che è avvenuta principalmente a spese della vegetazione di prateria alpina, la quale ha reagito con una concomitante migrazione verso quote superiori ma con ratei inferiori. Lo stesso trend è stato registrato anche per la vegetazione di valletta nivale e per la vegetazione di torbiera e delle zone umide (Cannone et al., 2007). In particolare, i risultati ottenuti al Passo dello Stelvio (Cannone et al. 2007) dimostrano per la prima volta che gli impatti del cambiamento climatico sono evidenti ad un livello ecologico superiore a quello della specie, che interessa intere comunità vegetali ed è visibile a livello di ampie superfici.

Le due aree di indagine del progetto Climaparks in Friuli Venezia Giulia

Sulla base di questi presupposti, nel 2011 il Parco Regionale delle Dolomiti Friulane ed il Parco Regionale delle Prealpi Giulie hanno coinvolto il Museo Friulano di Storia Naturale di Udine nella progettazione di una metodologia uniformata di monitoraggio e di analisi dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla biodiversità nell'ambito del Progetto "*Climaparks*"- Programma per la Cooperazione Transfrontaliera (Interreg Italia-Slovenia 2007-2013), in particolare per quanto riguarda i territori alpini dei due parchi. È stato quindi messo a punto un protocollo metodologico finalizzato alla valutazione ed al monitoraggio, sia a breve che a medio-lungo termine, degli impatti del cambiamento climatico sulle componenti vegetali ed animali degli ecosistemi terrestri e, ove possibile, anche

sulle loro potenziali interazioni con componenti particolarmente sensibili della componente abiotica (in particolare della criosfera) nel territorio friulano per un periodo di circa 15-20 anni.

Per quanto riguarda la componente vegetale, la metodologia di analisi proposta prevede i seguenti punti:

- Monitoraggio di specie e comunità vegetali in Plot permanenti (o aree di saggio) con dimensioni adeguate (Lévesque, 1996; Cannone, 2004). I permanent plot potranno essere installati in corrispondenza di comunità vegetali di particolare vulnerabilità ambientale (come ad esempio le comunità di valletta nivale) il cui monitoraggio fornisca elementi che permettano di individuare e quantificare gli impatti del cambiamento climatico.

- Monitoraggio delle principali componenti abiotiche: analisi dei suoli e dei parametri meteorologici.

- Rilievo fitosociologico per m^2 su tutti i 25 sub-plot di 1 x 1m.

- Rilievo fitosociologico 100 cm^2: ciascun sub-plot di 1 x 1 m viene diviso in celle di 10 x 10 cm.

-Point intercept method: va effettuato su tutti i 25 sub-plot di 1 x 1m; all'incrocio di ciascun nodo della griglia (con celle da 10 x 10 cm): posta su ciascun sub-plot viene registrata la presenza delle specie.

-Analisi della fenologia.

-Cartografia fitosociologica e di uso del suolo (1:2000).

Saxifraga oppostifolia specie artico-alpina frequenta habitat estremi quali rupi, morene e detriti nella fascia subalpina ed alpina

Per ciò che riguarda la componente faunistica, i dati relativi all'impatto del cambiamento climatico sulle risorse biologiche degli ecosistemi europei provengono essenzialmente da due principali fonti: il monitoraggio a lungo termine delle specie o degli ecosistemi e le proiezioni sulla futura incidenza tramite modellizzazione. Numerosi studi a questo proposito si sono concentrati, in particolare, sull'avifauna e sugli anfibi, mentre solo negli ultimi anni sono stati ottenuti i primi dati sugli invertebrati acquatici e terrestri.

Per la fauna il protocollo proposto prevede il monitoraggio delle comunità di alcuni taxa faunistici scelti per la loro comprovata idoneità come bioindicatori. In particolare è previsto il monitoraggio di Lepidotteri, Coleotteri Carabidi e Ragni tra gli invertebrati terrestri, di diversi gruppi di macroinvertebrati acquatici e degli Uccelli nidificanti tra i vertebrati.

La struttura del monitoraggio prevede l'individuazione delle stazioni di campionamento in plot permanenti ogni 100 metri di dislivello secondo transetti altitudinali che vanno dal piano subalpino a quello nivale, possibilmente coincidenti con quelli previsti per il monitoraggio delle comunità vegetali.

Per ciò che riguarda gli invertebrati, il protocollo proposto prevede:

- Campionamento quali-quantitativo dei Coleotteri Carabidi e dei Ragni con trappole a caduta (pitfall traps).

- Campionamento di Lepidotteri Ropaloceri ed Eteroceri appartenenti ai cosiddetti "Macrolepidotteri" ad attività diurna mediante raccolta a vista, a cui si aggiunge il campionamento dei "Macrolepidotteri" ad attività notturna mediante posizionamento di sorgenti luminose artificiali con emissione di diversificati spettri di lunghezza d'onda.

Per i macroinvertebrati bentonici di acque correnti sono stati selezionati tre bacini idrografici in ciascun Parco: è previsto il campionamento del tratto sorgentizio (crenal) ed epiritrale nelle testate del rio o torrente principale. Per quanto riguarda i gruppi faunistici coinvolti, è previsto il campionamento dei macroinvertebrati e della meiofauna, in particolare di Ditteri Chironomidi, Efemerotteri, Plecotteri, Tricotteri e Crostacei.

Per ciò che riguarda i vertebrati, il protocollo proposto prevede lo studio delle comunità di uccelli nidificanti effettuato attraverso la tecnica del conteggio delle presenze in punti di ascolto collocati nei medesimi plot previsti per gli invertebrati terrestri. Il campionamento prevede, nello specifico, il rilevamento delle presenze dell'avifauna entro 100 m dall'osservatore, collocato nel punto centrale della stazione, e delle presenze oltre 100 m; il rilevamento avviene mediante ascolto delle vocalizzazioni e osservazione degli individui, anche mediante l'utilizzo di sessioni di play-back e successivo ascolto.

Effettuando i monitoraggi proposti per alcuni anni è possibile tracciare un bilancio degli effetti dei cambiamenti climatici sulle comunità indagate, che a loro volta possono costituire indici rappresentativi dell'entità del fenomeno.

Bibliografia

Bahn M., Körner C., 2003 - Recent increases in summit flora caused by warming in the Alps. Ecol. Stud. 167: 437–41.

Cannone N., 2004 - Minimum area assessment and different sampling approaches for the study of vegetation communities in Antarctica. Antarctic Science, 16(2): 157 – 164.

Cannone N., Sgorbati S., Guglielmin M., 2007 - Unexpected impacts of climatic change on alpine vegetation. Frontiers in Ecology and the Environment 7: 360–364.

Chapin F.S., Sturm M., Serreze M.C. et al., 2005 - Role of land-surface changes in Arctic summer warming. Science 310: 657- 660.

Hughes L., 2000 - Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? Trends Ecol.Evol., 15: 56-61.

IPCC 2007 - Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Summary for policy makers. WMO, UNEP, Geneva, Switzerland.

Keller F., Goyette S., and Beniston M., 2005 - Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain. Clim Change, 72: 299–319.

Kullman L., 2002 - Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. J. Ecol. 90: 68–77.

Lenoir J., Gégout J.C., Marquet P.A. et al., 2008 - A Significant Upward Shift in Plant Species Optimum Elevation During the 20th Century. Science, 320: 1768-1771.

Lévesque E., 1996 - Minimum area and cover-abundance scales as applied to polar desert. Arctic and Alpine Research, 28: 156–162.

Parmesan C, Yohe G., 2003 - A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 421: 37–42.

Pauli H., Gottfried M., Reiter K. et al., 2007 - Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994–2004) at the GLORIA* master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology, 13: 147–156.

Root T.L., Price J.T., Hall K.R., et al. 2003 - Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature 421: 57–60.

Theurillat J.P. and Guisan A., 2001 - Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. Clim Change 50: 77–109.

Walther G., Post E., Convey P., et al., 2002 - Ecological responses to recent climate change. Nature 416: 389–95.

Walther G-R., Beißner S., Burga C.A., 2005 - Trends in the upward shift of alpine plants. J. of Veg. Sci.,16: 541–548.

Wookey P.A., Aerts R., Bardgett R.D., et al., 2009 - Ecosystem feedbacks and cascade processes: understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change Global Change Biology, 15: 1153–1172.

FOCUS Pollini primaverili-estivi e conseguenze di inverni sempre più miti

Francesca Tassan, Pierluigi Verardo - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente - S.O.S. Qualità dell'aria

Sintesi: La primavera e l'inizio dell'estate del 2016 si sono caratterizzate per una quantità di pollini di alcune specie arboree mai riscontrata nell'ultimo decennio. L'inverno particolarmente mite e la presenza di condizioni ottimali di piovosità hanno favorito le fioriture del carpino, faggio, castagno e platano, mentre hanno sfavorito quella della betulla. Nel presente studio, si evidenziano gli andamenti delle produzioni complessive di pollini in relazione ai profili delle temperature prevalenti.

La presenza di pollini in aria di una determinata specie è direttamente correlata sia all'abbondanza di piante di quella specie sul territorio che alle condizioni climatiche che ne favoriscano la fioritura. La rete di monitoraggio pollinico di ARPA FVG dall'anno 2005 verifica quantitativamente la presenza delle principali categorie di pollini trasportati dal vento presenti sul territorio, fornisce agli utenti dati giornalieri e settimanali, e popola una base dati che oggi consente di valutare l'andamento delle concentrazioni polliniche sul medio periodo, contestualizzandole nel quadro generale dei cambiamenti climatici quali veri e propri indicatori.

La quantità complessiva annua di un determinato polline dipende infatti da vari fattori, tra cui l'andamento delle temperature, oltre al cumulo giornaliero di ore di luce e quello stagionale delle giornate di pioggia. Per alcune specie arboree a fioritura primaverile, inoltre, conta anche l'andamento della stagione invernale precedente, che può influenzare la data di inizio fioritura, l'abbondanza di fiori e, di conseguenza, la quantità totale di pollini dispersi.

L'analisi dei dati derivanti dal monitoraggio di alcuni pollini, effettuato a livello regionale, e successivamente approfondita in un contesto più ampio, nazionale ed internazionale, contribuisce significativamente ad inquadrare i cambiamenti climatici in atto sotto il profilo degli effetti sull'ambiente e sulle persone.

È' il caso, in particolare, del carpino nero e della betulla, che nella primavera del 2016 hanno reagito in modo reciprocamente opposto all'andamento termico della stagione precedente; il primo con un aumento significativo del quantitativo totale annuo di pollini rispetto agli anni precedenti, la seconda con un netto calo, registrato soprattutto a Trieste. Per spiegare questo fenomeno, occorre premettere che il bilancio delle temperature dell'inverno 2015/16 mostra un incremento generalizzato rispetto alla media del decennio precedente, soprattutto in montagna, a fronte di una quantità di precipitazioni pressoché nella norma. Tale aumento anomalo delle temperature invernali nella nostra regione, allineato con il fenomeno più ampio dei cambiamenti climatici, se ha costituito un fattore di inibizione per alcune specie vegetali tipiche di climi freddi, quale la betulla, ha per contro operato uno stimolo della vitalità per altre, tra cui il carpino, che hanno risposto aumentando la attività biologica.

Analizzando nel dettaglio gli andamenti dei totali annui di pollini del carpino nero (Figure 1 e 2), si osserva che a Pordenone e Lignano Sabbiadoro nel 2016 hanno superato di 10 volte i valori medi degli anni precedenti. Specificamente, i totali annui di pollini di carpino nero a Pordenone si mostrano sostanzialmente paralleli all'andamento del differenziale tra le temperature minime e massime prevalenti (moda) negli anni 2005-2010 mentre nell'ultimo triennio si discostano notevolmente. È tuttavia evidente che, a partire dal 2013, la diminuzione del differenziale delle temperature è imputabile all'abbassamento delle temperature massime più che all'innalzamento delle minime (che presentano lo stesso profilo dei trienni 2006-2009 e 2010-2012). Il fenomeno

trova parziale conferma anche nella stazione di Lignano Sabbiadoro, dove peraltro la serie storica è più limitata, essendo il monitoraggio iniziato a giugno del 2011.

fig. 1 andamento dei pollini di carpino nero a Pordenone, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

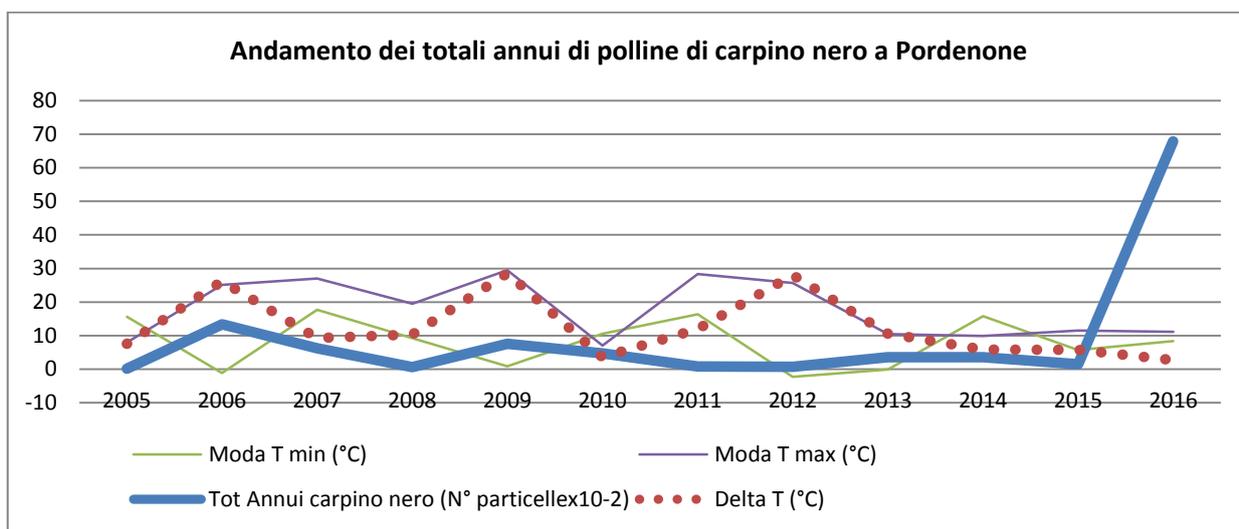



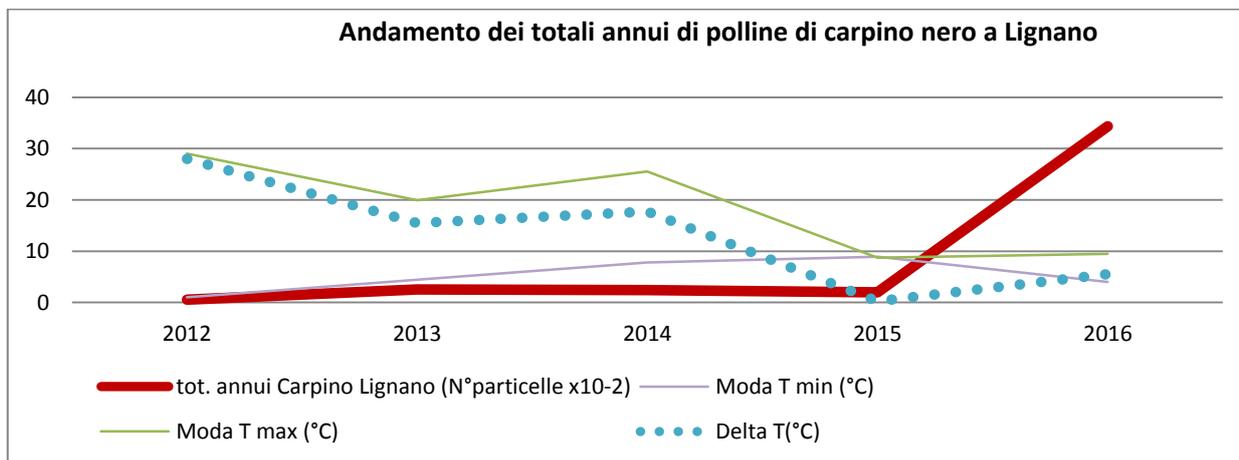
fig. 2 andamento dei pollini di carpino nero a Lignano, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

La betulla, invece, a Trieste dove è più diffusa, ha dimostrato di mantenere un trend di diminuzione di polline, che si fa sempre più significativo soprattutto nell'arco degli ultimi 10 anni, come si osserva nella Figura 3. Anche in questo caso, il netto decremento dei pollini registrato nel 2016 va di pari passo con la diminuzione del differenziale tra le temperature massime e le minime, più che con l'innalzamento delle temperature massime, che nell'ultimo biennio si sono attestate su valori inferiori agli anni precedenti.

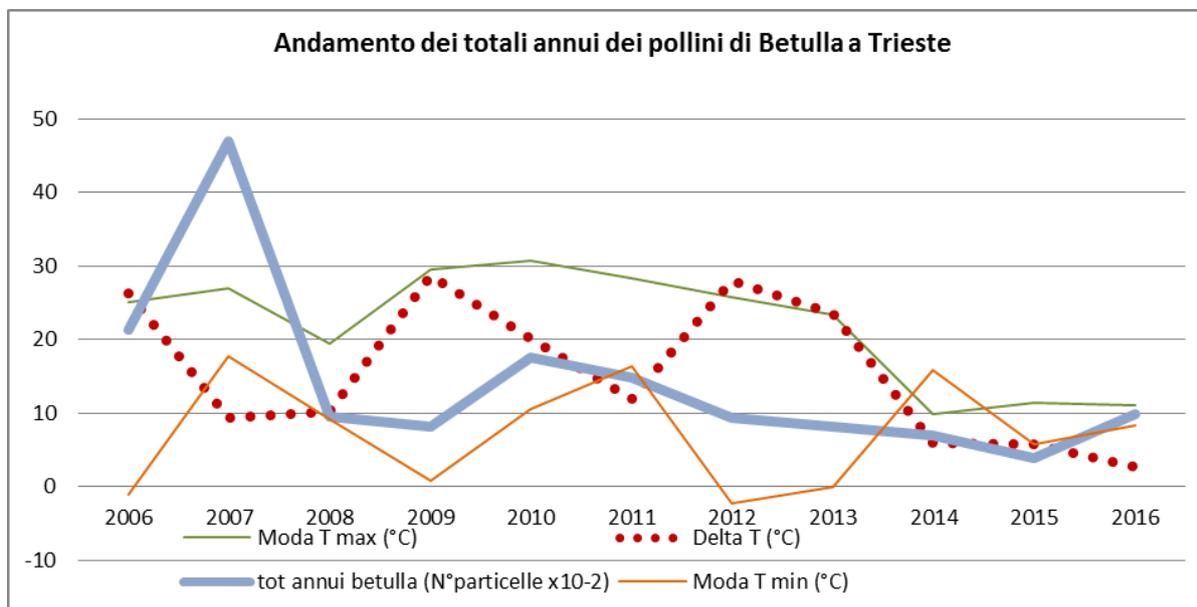
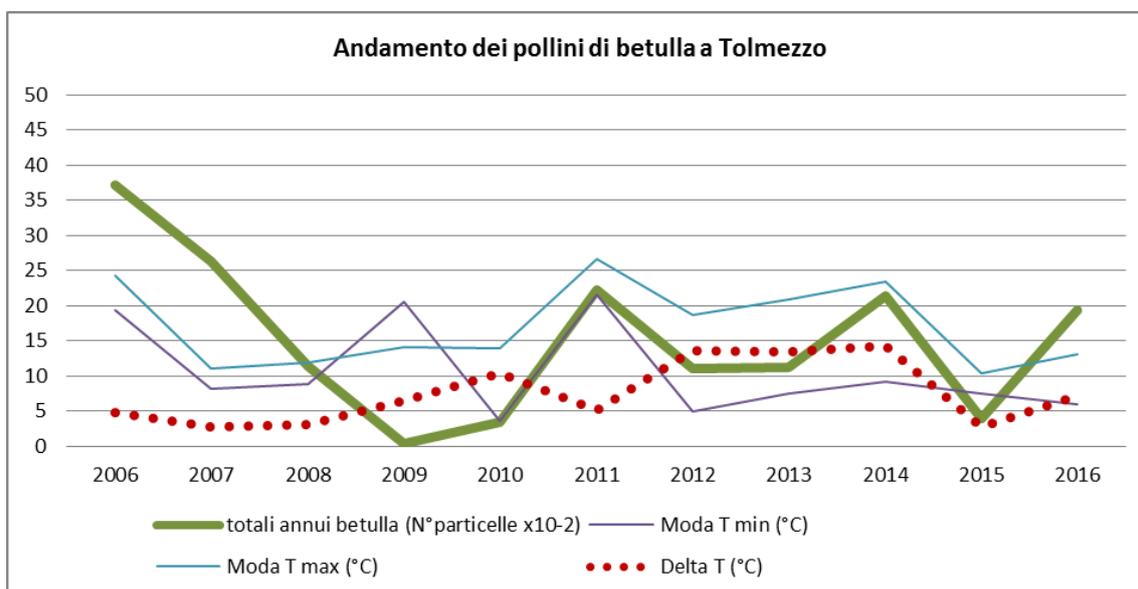
fig. 3 andamento dei pollini di betulla a Trieste, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

A Tolmezzo (Figura 4), dove pure questo albero è molto presente, nel 2016 si è registrato un leggero incremento, paragonabile ai picchi degli anni 2014 e 2011, in corrispondenza di abbassamenti delle temperature minime prevalenti. Questa pianta, tipica di climi freddi del centro e nord Europa, è relativamente diffusa nei boschi montali, ed è coltivata a scopo ornamentale in parchi e giardini. Il polline è molto allergenico, e la sua diminuzione nell'arco dei decenni dipende anche dalla consapevolezza dei cittadini e di alcune amministrazioni pubbliche di non procedere a nuove piantumazioni, viste le ricadute sulla salute. Anche la nostra Agenzia svolge un servizio di informazione ed indirizzo degli utenti verso una scelta di piante arboree non impattanti sulla salute e sull'ecosistema.

fig. 4 andamento dei pollini di betulla a Tolmezzo, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

Riguardo all'aumento dei pollini registrati nel corso del 2016, si possono fare alcune considerazioni analoghe a quanto riferito per il carpino nero osservando le Figure 5-10, che riportano, rispettivamente, i dati di monitoraggio dei pollini di platano a Pordenone, di faggio a Pordenone e Tolmezzo, di castagno a Pordenone, Tolmezzo e Trieste. Tuttavia, la corretta interpretazione dei dati riguardanti le produzioni polliniche registrate in regione per queste piante richiede alcune precisazioni.

Il platano è un'altra specie arborea a fioritura primaverile, molto presente in pianura ai bordi delle strade nelle zone extraurbane mentre, a Trieste, si trova soprattutto in ambito urbano; tuttavia non è stato possibile utilizzare i dati rilevati a nel capoluogo regionale a causa dei bassi livelli di pollini registrati, imputabili alle importanti potature che vengono effettuate sugli alberi durante l'inverno, prima della fioritura, per contenere il rischio derivanti dalle rotture dei rami a causa delle raffiche di bora. La Figura 5 mostra per questa pianta, a Pordenone, un trend di incremento pollinico marcatamente opposto all'andamento dei differenziali delle temperature massime e minime prevalenti, in calo nel quadriennio 2013-2016.

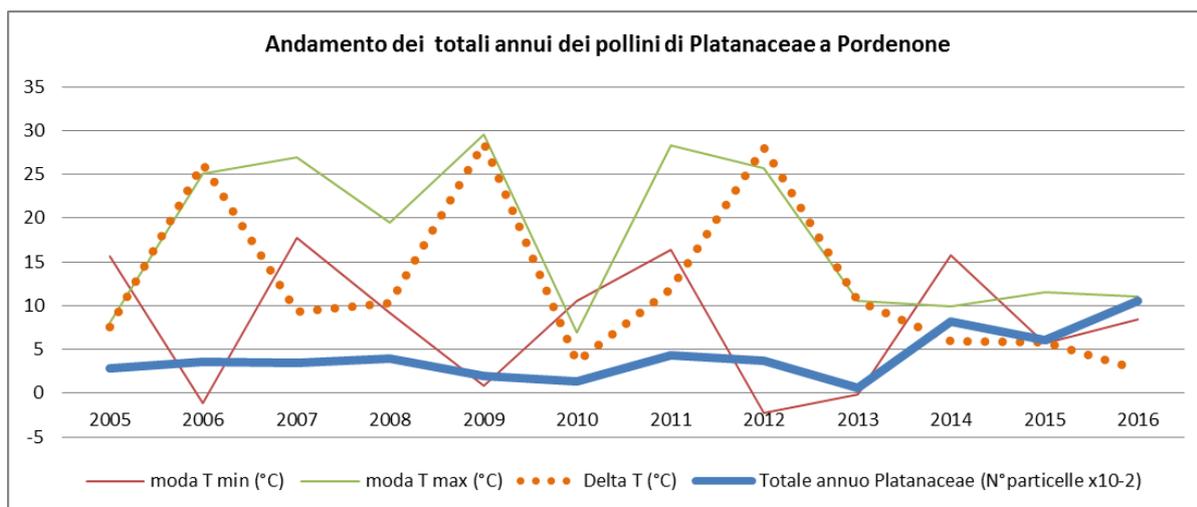
fig. 5 andamento dei pollini di platano a Pordenone, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

Il faggio (Fagus sylvatica) è una pianta che fiorisce ad anni alterni e nel 2016 ha rilasciato in aria quantità di pollini oltre dieci volte i quantitativi degli anni precedenti; è diffuso sia in montagna che nella fascia pedemontana; inoltre, insieme ad una varietà (Fagus tricolor) viene spesso piantumato a scopo ornamentale in giardini e parchi. Le Figure 6 e 7 mostrano i dati registrati dalle postazioni di Pordenone e Tolmezzo: anche nel caso di questa pianta, i quantitativi più elevati di pollini si registrano o in corrispondenza di annate caratterizzate da temperature massime prevalentemente elevate, come accaduto a Tolmezzo nel 2006, o, come per il carpino nero, nel caso di un abbassamento del differenziale tra le temperature massime e minime prevalenti, verificatosi negli ultimi due anni soprattutto a causa dell'innalzamento delle temperature minime prevalenti, mentre le temperature massime prevalenti si sono attestate su valori inferiori agli anni precedenti.

fig. 6 andamento dei pollini di faggio a Pordenone, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

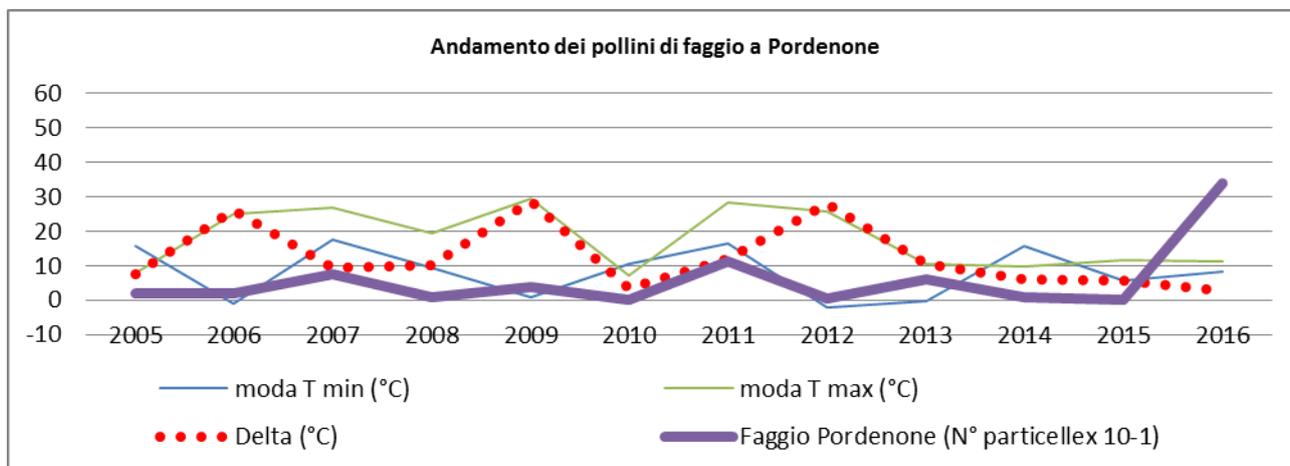



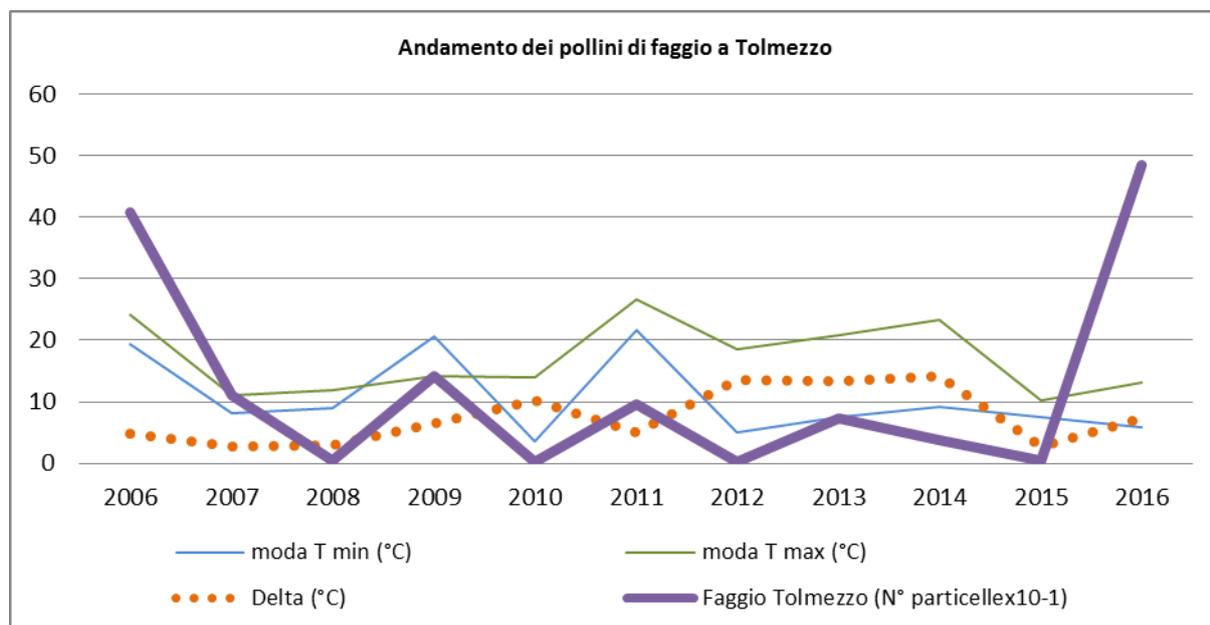
fig. 7 andamento dei pollini di faggio a Tolmezzo, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

Le Figure 8-10 mostrano i profili dei totali annui di pollini di castagno (Castanea sativa), registrati, rispettivamente, a Pordenone, Trieste e Tolmezzo. Il castagno fiorisce in estate, verso la fine di giugno, e negli ultimi anni era stato oggetto di pesanti attacchi da parte di un parassita dei germogli che ne ha ridotto notevolmente le fioriture e la produzione di frutti. Gli incrementi marcati nella produzione di pollini registrati nel 2016 sono da considerarsi anche un effetto della recente ripresa di questa pianta.

fig. 8 andamento dei pollini di castagno a Pordenone, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

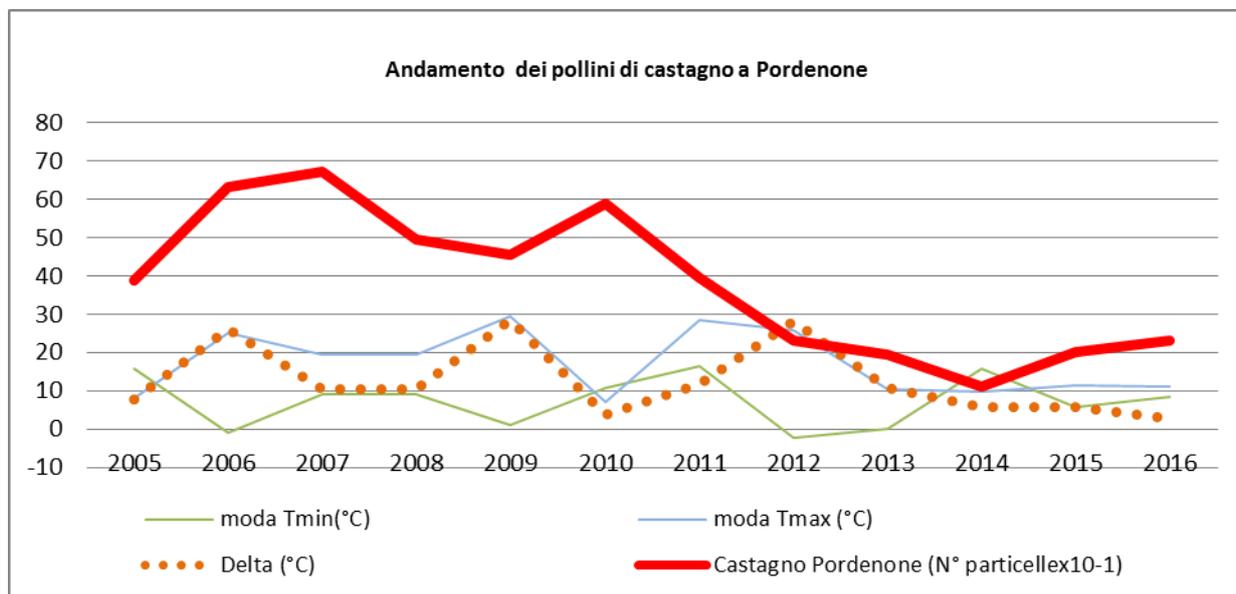



fig. 9 andamento dei pollini di castagno a Trieste, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

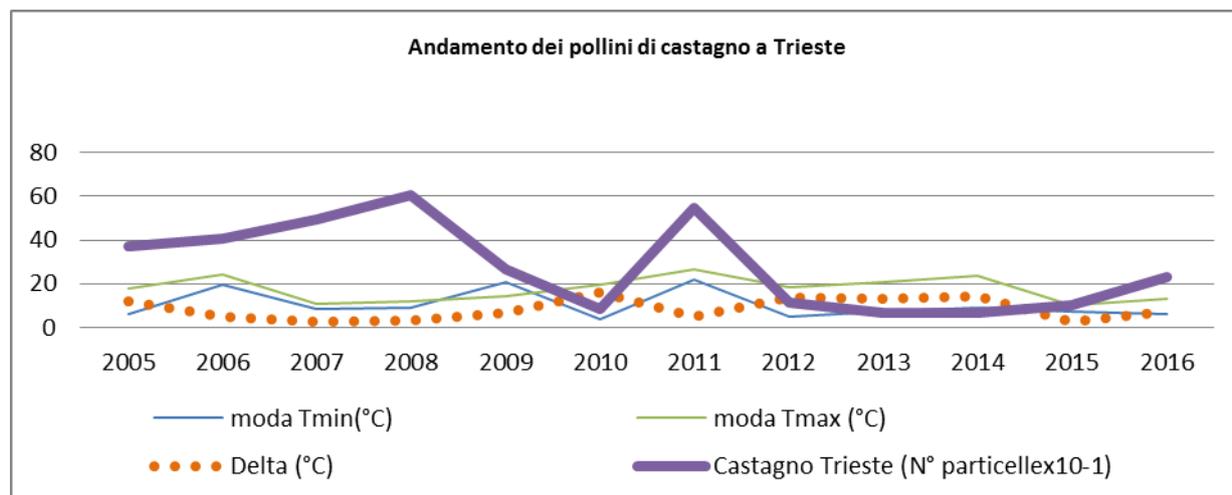
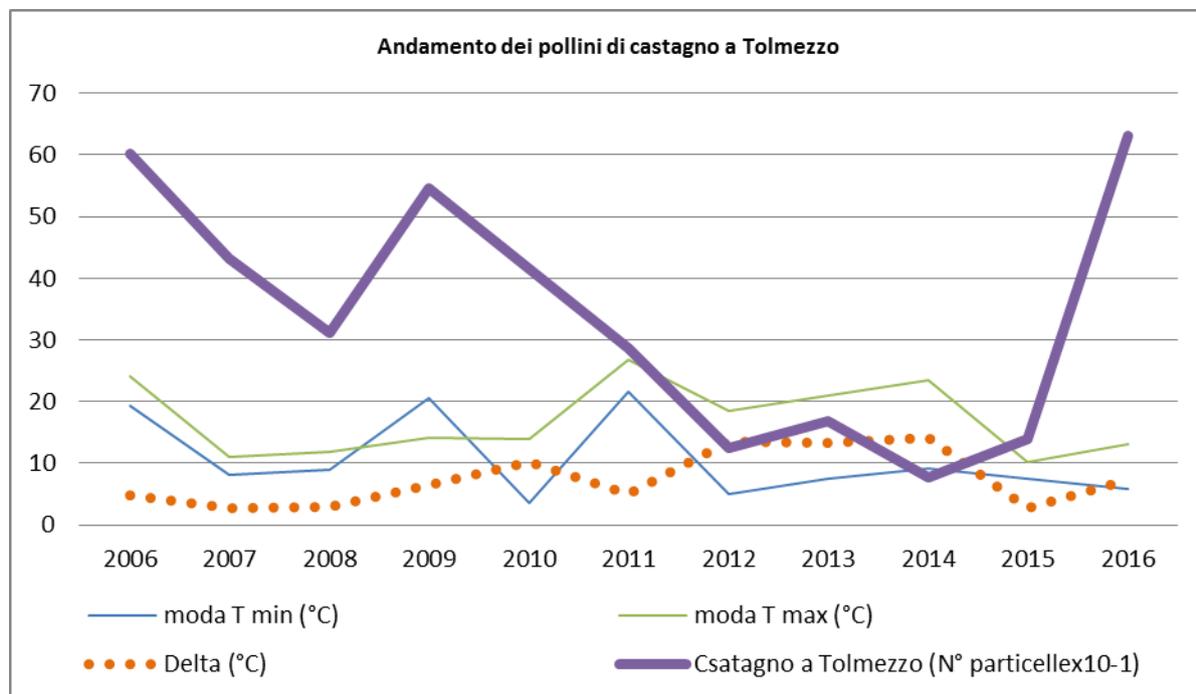



fig. 10 andamento dei pollini di castagno a Tolmezzo, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

I medesimi andamenti, riscontrati nella nostra regione, sono stati confermati dal confronto con i dati rilevati in tutta la Pianura Padana, e sono studiati parimenti nei paesi d'Oltralpe. In particolare, gli studi su ampia scala, derivanti dal proficuo scambio di informazioni con le Agenzie delle altre regioni italiane ed europee, permettono di monitorare gli effetti di parassiti e di piante infestanti di origine extraeuropea. Peraltro, questi aspetti, che sono pure connessi con il più ampio fenomeno dei cambiamenti climatici, si possono studiare e spiegare attraverso l'analisi di lunghe serie storiche di dati giornalieri.

Nonostante l'ampio spettro di studi condotti già da lungo tempo su molteplici fronti, le conseguenze del fenomeno del cambiamento del clima tuttavia non sono facilmente prevedibili, anche perché vanno ricercate in svariati ambiti: qualità degli ecosistemi, disponibilità di risorse, produttività dei suoli, salute umana. Ad esempio, anche solo considerando quest'ultimo aspetto sotto il profilo delle pollinosi, sicuramente si possono riscontrare delle ricadute dovute alla presenza in aria di grandi quantità di polline allergenico.

Altri impatti si possono avere sull'ecosistema, dove alcune piante risultano più vigorose e più cariche di semi rispetto al passato. I semi, quando sono più abbondanti del solito, possono modificare la catena alimentare del bosco, alterando gli equilibri tra le specie animali presenti. Alcuni studi specifici mostrano che l'abbondanza di semi di faggio, le faggiole, favorisce il proliferare dei piccoli roditori del bosco, come topolini ed avicole, i quali sono vettori di zecche. Le conseguenze sia sull'ecosistema, che soprattutto sulla salute dell'uomo e degli animali domestici, possono essere molto pesanti.

Per contro, le politiche di contenimento dell'uso del suolo, di salvaguardia delle aree verdi naturali, il ripristino della vegetazione riparia e di boschi planiziali mediante l'utilizzo di essenze autoctone sono esempi di azioni che possono avere effetti migliorativi nei confronti di un ecosistema impoverito e sofferente, e a lungo termine operare ricadute positive per la salute umana e ambientale. E' dimostrato infatti che lo sviluppo e la diffusione di specie esotiche è frenato dove esiste un ecosistema ben strutturato, caratterizzato da un'elevata biodiversità. La presenza di boschi

anche in pianura, unitamente ad un attento uso del suolo, ha dimostrato di poter rallentare i fenomeni, presenti anche alle nostre latitudini, di desertificazione ed impoverimento dell'ecosistema, operando effetti positivi anche sul clima, in un circolo finalmente virtuoso.

Fonti dati

ARPA FVG

Protezione Civile

Bibliografia

ARPA FVG, 2016, http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/aria/stato/Pollini/approfondimenti/Abbondanza-di-pollini-di-faggio-implicazioni-ambientali-e-sanitarie.html, ultimo accesso 1/9/2017.

ARPA FVG, 2016, http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/aria/stato/Pollini/news/carpino_nero.html, ultimo accesso 1/9/2017.

ARPA FVG, 2017, http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/aria/stato/Pollini/news/Giornata-di-studio-sui-pollini.html, atti del convegno.

ATOPICA.EU, 2015, http://conference.atopica.eu/media/4932/climate-change_factsheet_final_ita.pdf, ultimo accesso 1/9/2017.

ERSA, 2014, http://www.ersa.fvg.it/istituzionale/servizio-fitosanitario-regionale/organismi/cinipide-del-castagno-2/Relazione_2014_Amministrazioni_1.pdf

F. Zangari, 2012, Giardini senza polline, Zangari editore, volume primo.

REGIONE FVG; 1998, https://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/economia-imprese/agricoltura-foreste/foreste/allegati/Del_Favero_-_La_vegetazione_forestale_e_la_selvicoltura_in_FVG.pdf

Università degli studi di Padova, 2014, http://tesi.cab.unipd.it/46800/1/Lezier,_Alessandro.pdf

FOCUS I pollini di Ambrosia in relazione ai cambiamenti climatici

Francesca Tassan, Pierluigi Verardo - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente - S.O.S. Qualità dell'aria

Sintesi: La primavera e l'inizio dell'estate del 2016 si sono caratterizzate per una quantità di pollini di alcune specie arboree mai riscontrata nell'ultimo decennio. L'inverno particolarmente mite e la presenza di condizioni ottimali di piovosità hanno favorito le fioriture di alcune piante e sfavorito quella della betulla. Il castagno e l'Ambrosia sono stati colpiti da due parassiti nello stesso periodo e il fenomeno ha alterato la relazione tra temperature, fioriture e, di conseguenza, produzione di pollini. Nel presente studio, si evidenziano gli andamenti delle produzioni complessive di pollini di Ambrosia e castagno in relazione ai profili delle temperature prevalenti.

La fioritura, e conseguentemente, la produzione pollinica di due piante, il castagno e Ambrosia, sono state influenzate negativamente dalla diffusione, quasi contemporanea, di due differenti parassiti: un cinipide nel caso del castagno e un coleottero per l'Ambrosia. I due fenomeni si sono verificati a livello europeo a partire dal 2011 nel caso del parassitismo del castagno e dal 2012 per l'Ambrosia, con epicentro in Svizzera e Francia nel caso del coleottero parassita dei germogli di Ambrosia, e dall'est Europa per quanto riguarda il castagno, ma sono stati ben documentati anche nella nostra regione, sia dall'attività di ERSA che, indirettamente, dal monitoraggio pollinico di ARPA. Le Figure 1-4 mostrano gli andamenti dei totali annui di questi due pollini registrati presso le quattro postazioni di monitoraggio pollinico. Si osserva, per entrambi i tipi di polline, un notevole decremento negli anni 2010-2012 e una ripresa "sincrona" nel 2016. Se quest'ultimo anno ha segnato un aumento della produzione pollinica di molte piante, e questo fenomeno mostra di essere parallelo ad un aumento dei valori delle temperature minime prevalenti, a fronte di temperature massime prevalenti non particolarmente rilevanti rispetto agli anni precedenti, gli andamenti del periodo 2010-2015 potrebbero essere influenzati maggiormente dai fenomeni di parassitismo che hanno colpito queste due piante anche nella nostra regione. Oltre a questo fatto, vanno segnalati degli episodi di trasporto pollinico transfrontaliero, che si registrano ogni anno nel periodo tra metà agosto e l'inizio di settembre. Si tratta di aumenti improvvisi delle concentrazioni giornaliere di pollini, evidenti soprattutto presso le stazioni di Pordenone, Lignano e, in misura minore, Trieste per quanto riguarda la nostra regione, ma registrati pure presso le stazioni del litorale adriatico in Emilia Romagna e fino alle pendici appenniniche nelle Marche. Tali picchi sono associati a fenomeni di spostamenti di grandi masse d'aria a partire dall'est Europa, coinvolgendo un'area centrata nella zona Serbia-Ungheria notoriamente infestata da questa pianta. È difficile stabilire quanto questi fenomeni di trasporto influiscano sui totali annui di pollini di Ambrosia regionali; tuttavia, questi aspetti, unitamente ai ben più importanti effetti del parassitismo rendono il polline di Ambrosia poco adatto per il monitoraggio dei cambiamenti climatici a livello della regione Friuli Venezia Giulia.

fig. 1 andamento dei pollini di Ambrosia e castagno a Pordenone, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

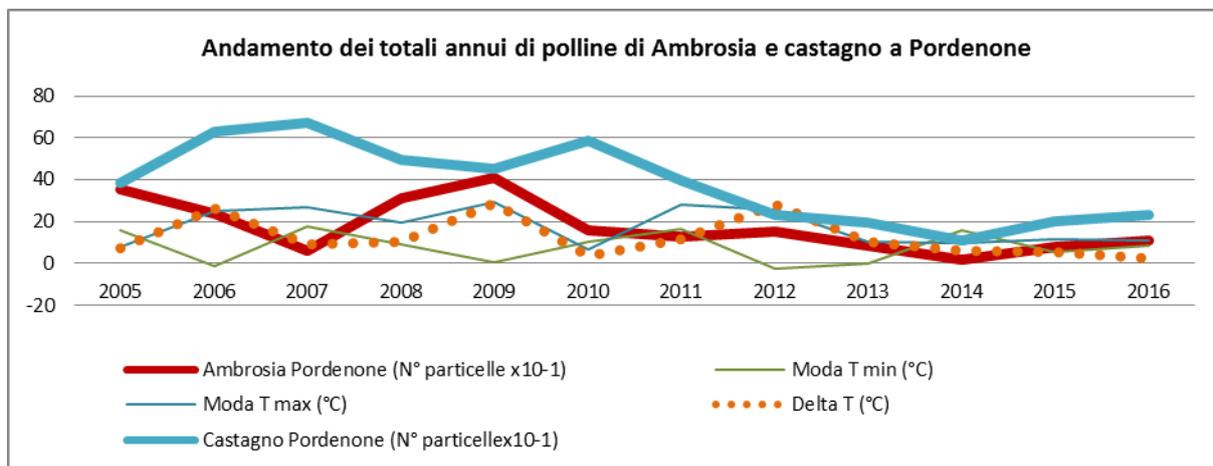



fig. 2 andamento dei pollini di Ambrosia e castagno a Trieste, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

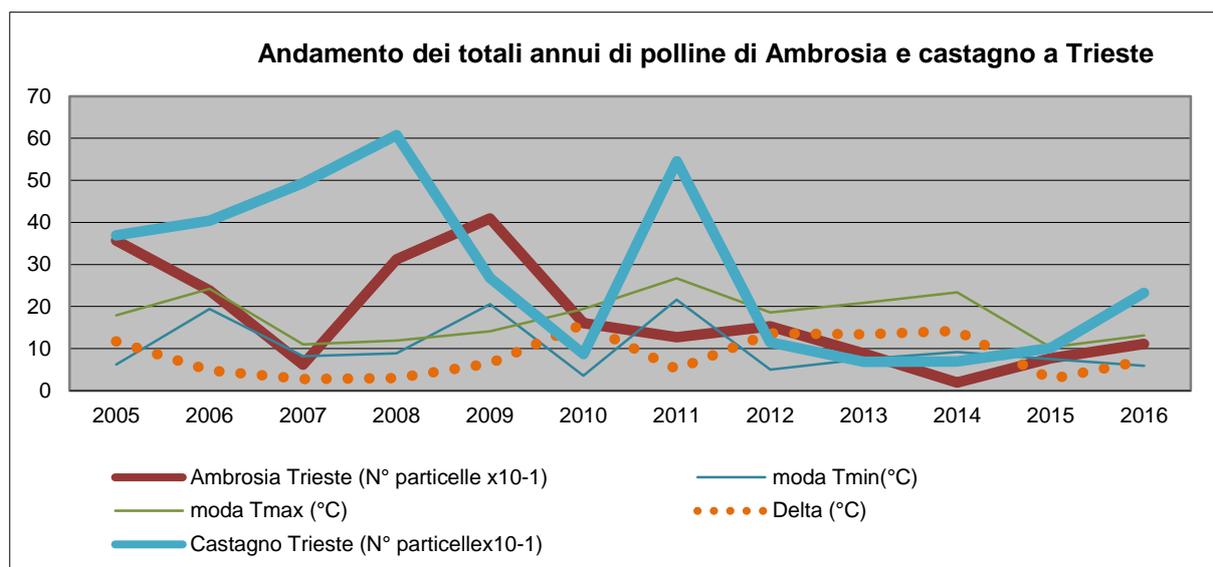
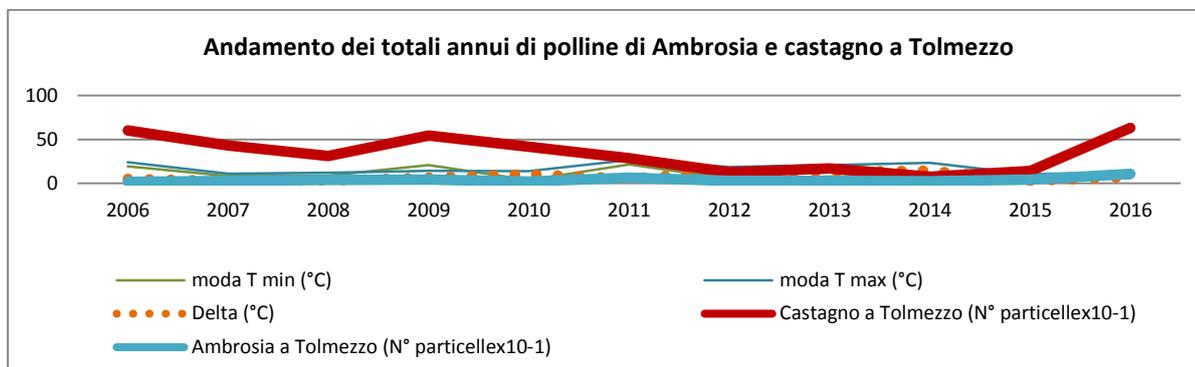



fig. 3 andamento dei pollini di Ambrosia e castagno a Tolmezzo, in relazione alle temperature minime (Moda T min) e massime (Moda T max) prevalenti e ai differenziali (Delta T) di tali grandezze

Fonti dati

ARPA FVG

Protezione Civile

Bibliografia

ARPA FVG, 2017, http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/aria/stato/Pollini/news/Giornata-di-studio-sui-pollini.html, atti del convegno.

ARPA FVG, RSA 2015

ATOPICA.EU, 2015, http://conference.atopica.eu/media/4932/climate-change_factsheet_final_ita.pdf, ultimo accesso 1/9/2017.

ERSA, 2014, http://www.ersa.fvg.it/istituzionale/servizio-fitosanitario-regionale/organismi/cinipide-del-castagno-2/Relazione_2014_Amministrazioni_1.pdf

http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/aria/stato/Pollini/approfondimenti/schede-1/schede/Fagaceae-Castanea.html

http://www.ersa.fvg.it/istituzionale/servizio-fitosanitario-regionale/organismi/cinipide-del-castagno/

REGIONE FVG; 1998, https://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/economia-imprese/agricoltura-foreste/foreste/allegati/Del_Favero_-_La_vegetazione_forestale_e_la_selvicoltura_in_FVG.pdf

FOCUS I Servizi Ecosistemici e la loro valutazione economica

Giovanni Bacaro, Marco Carpona, Enrico Tordoni, Rossella Napolitano, Stefano Martellos – Dipatimento di Scienze della Vita, Università di Trieste

Il concetto di Servizio Ecosistemico (da qui in avanti SE) è stato ampiamente utilizzato per capire e valutare i contributi diretti ed indiretti degli ecosistemi nei confronti del benessere umano (Boyd & Banzhaf, 2007; Braat & de Groot, 2012). Westman (1977) suggerisce la possibile quantificazione dei benefici sociali e non apportati dagli ecosistemi, fornendo informazioni utili per migliori politiche informative e gestionali. Secondo la sua definizione, questi benefici possono essere descritti come "[…] le condizioni e i processi attraverso i quali gli ecosistemi naturali e le specie che li costituiscono, sostengono e realizzano la vita umana". Costanza et al. (1997) definiscono 17 categorie principali di servizi ecosistemici, distinte in *benefici "diretti ed indiretti"*, derivabili dalle stesse funzioni ecosistemiche. Ciò significa che una parte di questi servizi non sono consumati direttamente dalla popolazione, ma sono comunque necessari per sostenere l'ecosistema stesso. Il *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), un importante progetto di ricerca durato cinque anni e condotto e finanziato dalle Nazioni Unite (in particolare modo dall'*United Nations Environmental Programme UNEP*) definisce i SE come "i benefici multipli forniti dagli ecosistemi al genere umano".

Figura 1: Relazione tra Servizi Ecosistemici e principali effetti sul benessere umano

Ecosystem Services

SUPPORTING SERVICES

Services necessary for the production of all other ecosystem services

- Soil formation
- Nutrient cycling
- Primary production

Provisioning Services

Products obtained from ecosystems

- Food
- Fresh water
- Fuelwood
- Fiber
- Biochemicals
- Genetic resources

Regulating Services

Benefits obtained from regulation of ecosystem processes

- Climate regulation
- Disease regulation
- Water regulation
- Water purification

Cultural Services

Nonmaterial benefits obtained from ecosystems

- Spiritual and religious
- Recreation and ecotourism
- Aesthetic
- Inspirational
- Educational
- Sense of place
- Cultural heritage

Determinants and Constituents of Well-being

Security

- Ability to live in an environmentally clean and safe shelter
- Ability to reduce vulnerability to ecological shocks and stress

Basic Material for a Good Life

- Ability to access resources to earn income and gain a livelihood

Health

- Ability to be adequately nourished
- Ability to be free from avoidable disease
- Ability to have adequate and clean drinking water
- Ability to have clean air
- Ability to have energy to keep warm and cool

Good Social Relations

- Opportunity to express aesthetic and recreational values associated with ecosystems
- Opportunity to express cultural and spiritual values associated with ecosystems
- Opportunity to observe, study, and learn about ecosystems

FREEDOMS AND CHOICE

Un concetto di fondamentale importanza affermato nel MEA è il legame tra i SE e il benessere della società: la Figura 1 descrive i vari flussi che dai SE si dipartono, sostenendo direttamente ed indirettamente il benessere umano, permettendo di superare l'idea che protezione dell'ambiente e sviluppo economico rappresentino interessi discordanti ed in competizione tra loro.

I risultati forniti dal MEA mostrano come, negli ultimi 50 anni, l'uomo abbia modificato gran parte degli ecosistemi e conseguentemente la loro capacità di fornire SE (su 24 SE analizzati, 15 sono risultati danneggiati). Questo è dovuto soprattutto alle sempre più crescenti necessità di cibo, acqua, legname, fibre e fonti energetiche. Il lavoro del MEA, insieme a molti altri studi, influenzerà lavori successivi come quello del progetto TEEB (The Economics of Ecosystems and Biodiversity, www.teebweb.org), il quale definisce una lista di 22 SE (TEEB 2010) e una lista semplificata rivolta agli amministratori e stakeholder locali (TEEB 2010). In base a questa, i SE vengono classificati in quattro principali categorie:

- **Servizi di approvvigionamento:** sono i prodotti diretti ottenibili dagli ecosistemi, come ad esempio il cibo, l'acqua potabile, il legno, fibre, risorse genetiche e medicine;
- **Servizi di regolazione**: sono definiti come i benefici ottenuti dalla regolazione dei processi ecosistemici, come la regolazione del clima, della qualità dell'aria e delle acque. Altri esempi di questi servizi sono la regolazione dell'impollinazione, dell'assimilazione dei rifiuti, la formazione del suolo, e la mitigazione dei rischi naturali, ad esempio l'erosione.
- **Servizi di supporto**: sono quei SE che provvedono al mantenimento degli habitat per gli esseri viventi, mantenendo una diversità genetica tra le specie.
- **Servizi culturali**: essi sono definiti come i benefici non materiali che le persone ottengono dagli ecosistemi, quali l'identità culturale, l'arricchimento spirituale e intellettuale, ed i valori estetici e ricreativi. Anche il turismo viene considerato un SE culturale.

Tale studio ha valutato la perdita annuale dei SE in 50 miliardi di euro, stimando una perdita di biodiversità pari al 7% del PIL mondiale entro il 2050 qualora l'attuale scenario dovesse rimanere inalterato e non considerando la perdita dei SE marini che risultano difficili da quantificare.

Relazioni tra SE e cambiamenti climatici

L'impatto dei cambiamenti climatici sui SE non è stato ancora ben definito dalla comunità scientifica, tuttavia simulazioni sembrano mostrare scenari relativamente negativi dove le perdite relative ai SE superano i guadagni da essi derivanti. Questi impatti potranno verificarsi a livello globale in diversi ecosistemi influenzando il benessere della maggior parte della popolazione globale (Scholes, 2016). Da notare che alcune categorie di SE spesso variano in modo congiunto (sia positivamente che negativamente), creando una fitta rete di interazione che sono state definite con il concetto di "ecosystem service bundle". Qui di seguito saranno esposti alcuni dei principali effetti dei cambiamenti climatici sui SE in base alla categorie di SE fornite nel *Millennium Ecosystem Assessment*.

Servizi di fornitura

La popolazione umana è destinata ad aumentare del 43% entro il 2050 con un conseguente aumento della domanda di risorse. È atteso un incremento delle aree agricole con ulteriori incrementi nell'uso di acqua e pesticidi che potrebbero avere effetti negativi sugli ecosistemi naturali. I cambiamenti climatici posso avere effetti localizzati sulle disponibilità alimentari e sono generalmente negativamente correlati ad uno scenario di riscaldamento globale. Per modeste variazioni di temperature (entro 1-2°C dal periodo pre-industriale) non sono attese variazioni significative a livello globale, ma qualora la variazione di temperature media superasse i 2°C effetti negativi sarebbero inevitabili soprattutto sul settore agro-silvopastorale. Inoltre, è stata registrata una maggiore mortalità negli alberi (cosiddetto fenomeno di *dieback*) in seguito a ondate di calore, siccità, incendi e danni da tempeste, che sono fenomeni destinati ad aumentare in frequenza ed intensità a seguito del riscaldamento globale. Per quanto riguarda l'uso dell'acqua, è noto che le riserve idriche globali sono minacciate dai cambiamenti climatici sia per quantità di acqua disponibile che per qualità della stessa. A causa dell'interazione tra evapotraspirazione e precipitazioni, è attesa una riduzione delle acque di deflusso nei tropici (dove sia avrà anche maggiore domanda) ed un suo incremento nelle aree subtropicali e temperate (dove la domanda resterà più o meno costante). Per di più, un innalzamento delle temperature può portare ad una temperatura media dell'acqua più elevata con un peggioramento della sua qualità a causa della presenza di patogeni e/o alghe.

Servizi di regolazione

Questa categoria di SE è quella più intimamente legata alla biodiversità e integrità degli ecosistemi. Attualmente, gli ecosistemi terrestri e marini assorbono circa la metà delle emissioni di CO_2 derivanti da attività antropiche anche se la frazione di CO_2 nell'atmosfera derivante da attività antropiche è in continua crescita. L'aumento nell'incidenza e frequenza di eventi catastrofici (es. tempeste ed inondazioni) è uno delle principali conseguenze dei cambiamenti climatici, è necessario perciò lasciare intatte porzioni di territorio con vegetazione ripariale e costiera per attenuarne gli effetti. È stato dimostrato infatti che le comunità naturali forniscono una più economica (e resiliente) difesa contro gli eventi estremi rispetto ad opere ingegneristiche tipiche del secolo scorso. Persino il fenomeno dell'impollinazione, basilare per la produzione di cibo (e altri SE in generale), sta subendo delle alterazioni legate al declino degli insetti impollinatori. Infatti, ci sono evidenze scientifiche che suggeriscono come il cambiamento nella fenologia delle specie vegetali legato al riscaldamento globale sia una delle cause alla base di questo trend negativo.

Servizi culturali

Come già detto in precedenza, i valori culturali di un ecosistema sono difficilmente quantificabili. Questi sono basati sulla percezione del paesaggio da parte della società e probabilmente sono influenzati dai cambiamenti climatici anche se mancano studi scientifici accurati al riguardo. Per quel riguarda quelli ricreativi (es. turismo), un innalzamento delle temperature può portare alla riduzione della copertura nevosa nell'area alpina con conseguente riduzione degli introiti derivanti dalle attività outdoor legate agli sport invernali.

Valutazione dei Servizi Ecosistemici

De Groot et al. (2002) forniscono uno schema per la valutazione di beni e servizi ecosistemici (Figura 2): complessi sistemi ecologici (Ecosystem Structure & Process) possono essere semplificati in un limitato numero di funzioni (Ecosystem Functions), che a loro volta forniscono beni e servizi ecosistemici (Ecosystem Goods & Services). I SE hanno diversi valori (ecologici, economici e socio-culturali) che contribuiscono al calcolo del valore totale (Total Value), che sarà poi preso in considerazione nelle decisioni politiche e gestionali, con conseguenti ricadute negli ecosistemi stessi.

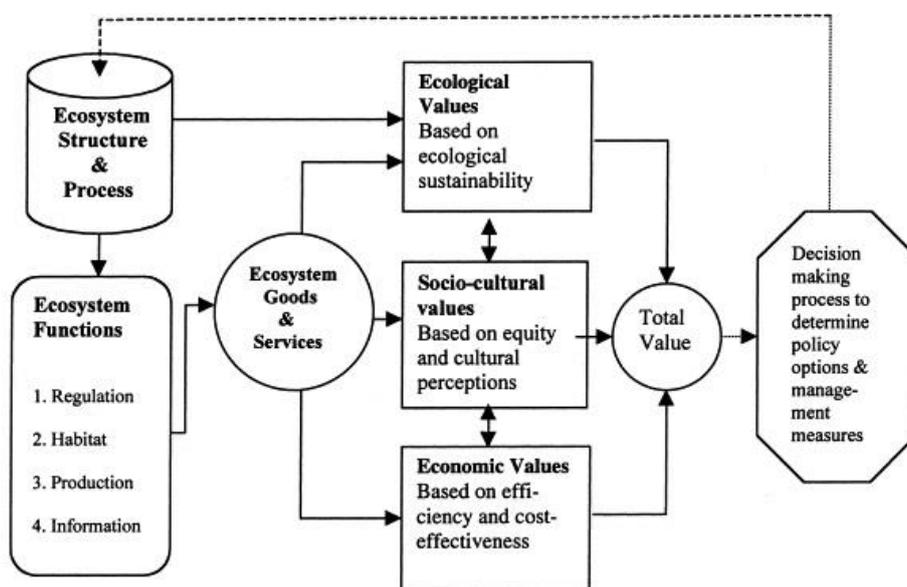
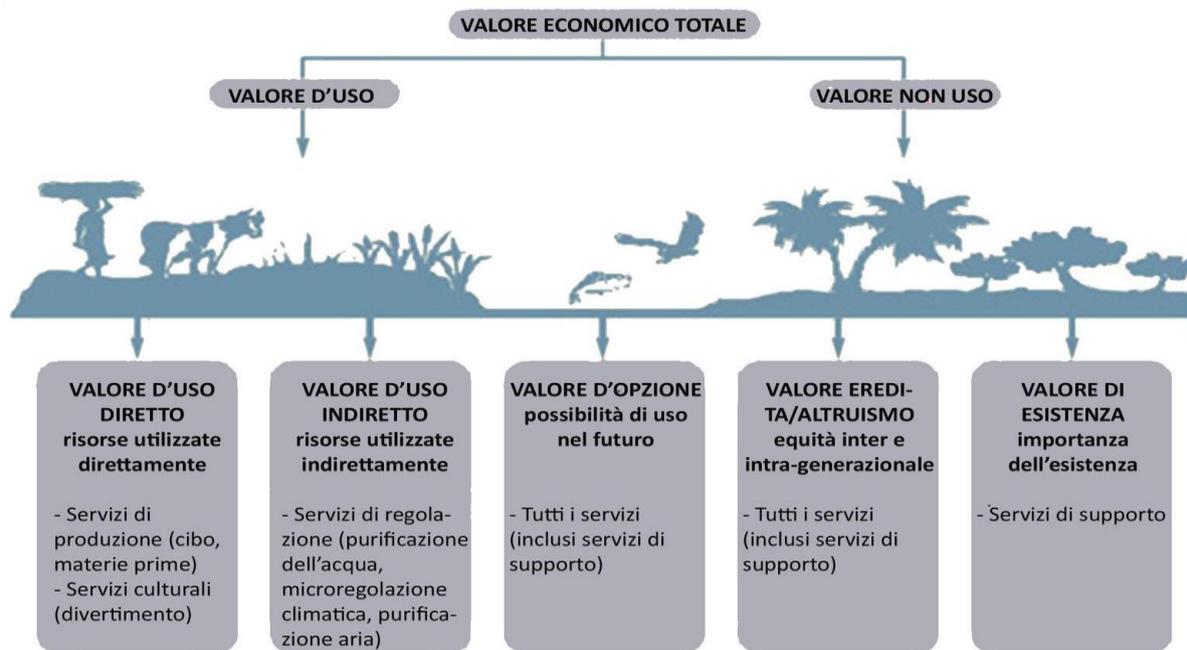
Figura 2: schema di valutazione di beni e servizi ecosistemici adottato da De Groot et al. (2002)

In Italia, dal punto di vista legislativo, la valutazione monetaria dei SE è garantita dalla legge del 28 dicembre 2015, n. 221 "disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali". Nello specifico, l'art. 70 rappresenta una delega al Governo per l'introduzione di sistemi di remunerazione dei servizi ecosistemici e ambientali, e la lettera *d* del comma 2 prevede che siano remunerati i servizi di fissazione del carbonio delle foreste e dell'arboricoltura da legno, la regimazione delle acque nei bacini montani e la salvaguardia della biodiversità delle prestazioni ecosistemiche e delle qualità paesaggistiche. La valutazione monetaria dei SE può essere associata al concetto di valore economico totale (Heal et al., 2005), definito come la somma dei valori di tutti i flussi dei servizi che il Capitale Naturale genera sia ora che in futuro. Il valore economico totale viene normalmente suddiviso in valore d'uso e valore di non uso (Figura 3).

Figura 3: Valore d'uso e non uso dei Servizi Ecosistemici (fonte: Gomes-Bazzethun & Ruiz Perez, 2011)

Il valore d'uso deriva dalla diretta o indiretta utilizzazione di un bene materiale e non, come la produzione alimentare, la regolazione del clima o il valore ricreativo. Nello specifico, il valore d'uso diretto comporta un uso diretto di un bene o di un servizio (es. servizi di approvvigionamento, servizi culturali e ricreativi). Il valore di non uso invece descrive la consapevolezza degli individui che il bene esiste, a prescindere dall'effettivo utilizzo, pagando il costo del bene per le generazioni successive (valore di eredità) o per gli altri (valore di esistenza). Oltre il valore d'uso diretto ed indiretto, vi sono anche i valori di opzione, che rappresentano quelle situazioni in cui l'individuo non utilizza nell'immediato il bene/servizio, ma continua a pagare una certa somma per avere la possibilità in futuro di poterne usufruire.

Per quantificare un SE possono essere applicate diverse tecniche di valutazione dei servizi ecosistemici, tra cui risultano importanti:

Stima del Prezzo di mercato: basato sulla misurazione del valore del SE attraverso i prezzi di mercato, usato spesso per i servizi di approvvigionamento, come per esempio il prezzo del legname.

Approccio basato sui costi: cioè la stima dei costi qualora fosse stato necessario generare artificialmente gli stessi benefici ottenuti dai SE (Garrod and Willis, 1999). Per esempio, il costo di un depuratore che purifica l'acqua, sostituendo i relativi SE.

Funzione di produzione: usato per capire quanto un SE contribuisca alla fornitura di un altro bene o servizio.

Metodo del prezzo edonico: la stima del valore economico dei SE che influenzano direttamente i prezzi di mercato, come quello immobiliare. Infatti, il valore di un'abitazione dipende anche dall'ambiente che la circonda (qualità dell'aria, vista, ecc.).

Travel cost method (metodo del costo del viaggio): utilizzato spesso per i servizi culturali/ricreativi. Il tempo necessario ed il prezzo di un viaggio per arrivare ad un determinato posto (ad es. un parco naturale) che fornisce un SE, rappresentano parte del prezzo di accesso al sito.

I costi di altri tipi di SE, non essendo associati direttamente a prodotti commerciali, non possono essere calcolati direttamente con i metodi sopra esposti. In questo caso, vengono adottati differenti metodi di valutazione come, ad esempio, l'uso di questionari al fine di indagare il valore che i cittadini danno a una serie di beni e servizi che non sono oggetto di mercato e che quindi non hanno un prezzo definito.

Bibliografia

- Boyd J., Banzhaf S. (2007). What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. Ecological Economics 63: 616-626.

- Braat L.C., de Groot R. (2012). The ecosystem services agenda:bridging the worlds of natural science and economics, conservation and development, and public and private policy. Ecosystem Services 1: 4-15.

- Costanza R., Darge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., Oneill R.V., Paruelo J., Raskin R.G., Sutton P., van den Belt M. (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature 387: 253–260.

- de Groot R.S., Wilson M.A., Boumans R.M.A. (2002) A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics 41: 393-408.

- Garrod G., Willis K. (1999) Economic Valuation of the Environment: Methods and Case Studies. Environmental & Resource Economics 21: 101-102.

- Gomez-Baggethun E. , Ruiz Perez M. (2011). Economic valuation and the commodification of ecosystem services. Progress in Physical Geography 32: 431–446

- Heal G.M., Barbier E.E., Boyle K.J., Covich A.P., Gloss S.P., Hershner C.H. (2005) Valuing Ecosystems Services: Toward Better Environmental Decision-Making. Washington, DC: National Research Council.

- Millennium Ecosystem Assessment - MEA (2005) Ecosystems and Human Well Being: Synthesis. Island Press.

- Scholes RJ (2016) Climate change and ecosystem services *WIREs Climate Change* 7:537–550.

- TEEB (2010) The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB.

- Westman, W. (1977) How much are nature's services worth. Science 197: 960-964.

2.6 Ecosistemi marini

Le emissioni di gas serra e i conseguenti cambiamenti climatici globali hanno conseguenze rilevanti sulle risorse marine naturali e sui servizi ecosistemici marini. La Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNACC) considera l'ambiente marino un patrimonio prezioso che deve essere salvaguardato e, ove possibile, ripristinato al fine ultimo di mantenere la biodiversità e preservare la diversità e la vitalità di mari ed oceani.

In ambito regionale i macro impatti previsti sono relativi all'**alterazione delle caratteristiche e dei processi chimico-fisici** e all'**alterazione delle comunità ecologiche e delle reti trofiche**, fenomeni che probabilmente riguarderanno tutto l'Adriatico settentrionale con le sue lagune.

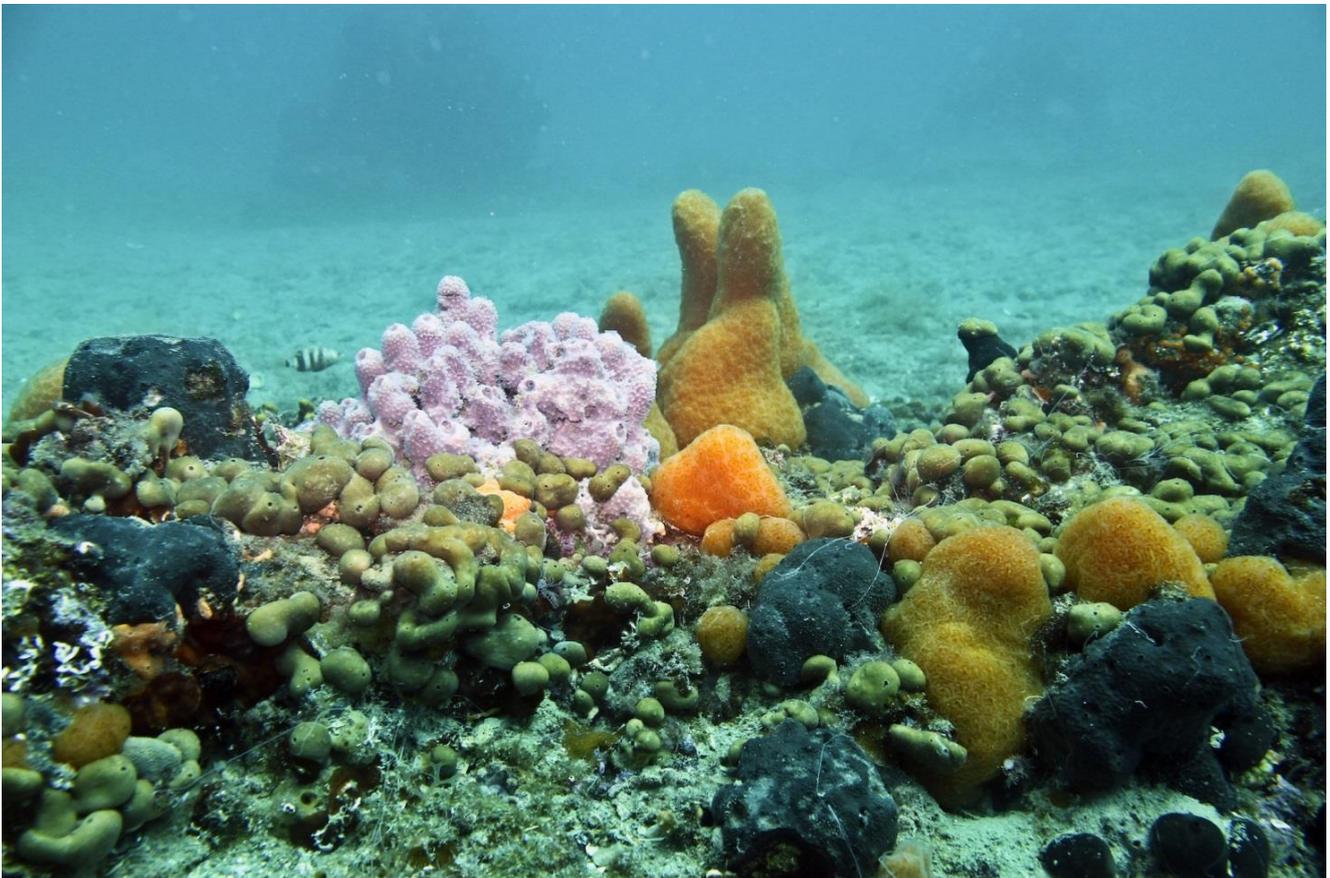
foto 2.6.1 - Habitat a fondo duro nel Golfo di Trieste

Nella tabella 2.6.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tabella 2.6.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini, descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)		IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Alterazione delle caratteristiche e dei processi chimico-fisici	**Alterazione delle comunità ecologiche e delle reti trofiche marine**			
X		**Aumento della temperatura media globale delle acque superficiali**	Nel periodo 2021-2050 secondo lo scenario RCP8.5 tutte le aree costiere italiane saranno caratterizzate da un aumento di temperatura rispetto al periodo di riferimento 1981-2010. Per il bacino Adriatico tale aumento avrà valori compresi tra 1.5° e 2° C.	Riscaldamento delle acque superficiali
X	X	**Aumento della salinità superficiale**	Il decremento significativo degli apporti fluviali dovuto alla riduzione delle precipitazioni determinerà un aumento evidente della salinità superficiale soprattutto nelle aree costiere caratterizzate dalla presenza di lagune ed estuari. Pertanto si assisterà ad una marinizzazione degli ambienti lagunari e all'intrusione del cuneo salino nella rete tributaria dei corpi d'acqua dolce. La conseguenza sarà una diminuzione delle superfici occupate dalle specie mesoaline, con un cambiamento radicale della composizione delle biocenosi acquatiche.	Alterazione del regime delle precipitazioni
X	X	**Alterazione della circolazione delle masse d'acqua**	Alterazione dei cicli vitali e riproduttivi delle specie di vertebrati e invertebrati marini; alterazione del trasporto e distribuzione di uova e larve di organismi marini in fase pelagica.	Modificazioni termiche delle masse d'acqua
X	X	**Riduzione del pH delle acque marine**	Alterazione nella componente scheletrica degli organismi; alterazione della produzione secondaria e del successo di reclutamento con particolare riferimento a specie biocostruttrici e molluschi bivalvi.	Aumento della CO_2 atmosferica
X	X	**Decremento del livello di ossigeno disciolto**	Alterazione della biodiversità e della struttura dei popolamenti planctonici e bentonici; morie di organismi; alterazione cicli biogeochimici.	Modificazioni termiche delle masse d'acqua
X	X	**Diminuzione della produzione primaria in colonna d'acqua**	Riduzione del fitoplancton ed aumento percentuale delle forme microalgali più piccole; modificazione della fenologia dei popolamenti microalgali.	Modificazioni termiche delle masse d'acqua
X	X	**Modificazione degli habitat vegetati**	I cambiamenti del livello del mare, della salinità, della temperatura, della CO_2 atmosferica e delle radiazioni UV possono alterare la distribuzione, la produttività e la composizione degli habitat vegetati a macroalghe e fanerogame marine. I potenziali cambiamenti nella distribuzione e struttura di tali habitat possono avere implicazioni importanti sul biota.	Modificazioni termiche delle masse d'acqua, aumento CO_2 atmosferica, innalzamento livello del mare
X	X	**Comparsa e insediamento di specie aliene**	Diminuzione della resilienza degli ecosistemi marini con conseguente minore capacità di contrastare l'insediamento di specie non indigene.	Modificazioni termiche delle masse d'acqua
X	X	**Comparsa e insediamento di specie indigene termofile**	Aumento dell'importanza delle specie indigene termofile che possono incidere negativamente sulle comunità autoctone, soprattutto ad indole fredda, con ripercussioni sull'equilibrio degli ecosistemi marini ed impatto sul settore ittico.	Modificazioni termiche delle masse d'acqua

Tali alterazioni, determinate essenzialmente dall'aumento della CO_2 atmosferica, dal riscaldamento delle acque superficiali, dalla modificazione del regime delle precipitazioni e dall'innalzamento del livello medio del mare, porteranno presumibilmente ad un aumento della temperatura media globale delle acque superficiali e della salinità con conseguente **alterazione della circolazione** delle masse d'acqua, nonché al decremento del livello di ossigeno disciolto al fondo.

Come conseguenza si prefigura una ulteriore diminuzione della produzione primaria ad opera del fitoplancton, la modificazione degli habitat vegetati al fondo, nonché la comparsa e l'insediamento di nuove specie aliene e di specie indigene termofile a scapito della componente autoctona ad indole più fredda. Tali fenomeni sono già rilevabili in varia misura da almeno un ventennio nelle acque del Golfo di Trieste e nella Laguna di Marano e Grado e potranno via via acuirsi, sulla base dei modelli climatici per il Friuli Venezia Giulia.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 30
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 230-275
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 - pag. 40-50

Vedi anche il caso studio:
3.4 *L'ecosistema marino del Golfo di Trieste*

FOCUS Cambiamenti climatici e ambiente marino-costiero

Alessandro Acquavita, Nicola Bettoso - ARPA-FVG - S.O.C. Stato dell'ambiente –
S.O.S. Qualità acque marine e di transizione

Il ricambio generale delle acque dell'Adriatico è garantito da un **circuito ciclonico (antiorario)** di correnti stabili nel tempo, determinate principalmente dalle differenze di salinità e temperatura – e quindi di densità – che si stabiliscono tra le acque delle regioni settentrionali e quelle meridionali del bacino. In effetti d'estate le acque dell'Adriatico settentrionale sono più leggere a causa degli apporti fluviali e quindi scorrono verso Sud sulle acque sottostanti; d'inverno sono più pesanti a causa del maggior raffreddamento e quindi scorrono sui fondali verso le maggiori profondità. A causa della rotazione terrestre questo deflusso verso Sud avviene lungo la costa occidentale ed è controbilanciato dalla risalita di acque meridionali lungo la costa orientale. La morfologia costiera e quella dei fondali induce poi la formazione di circuiti di minore estensione. A Nord si sviluppa il circuito dell'Adriatico settentrionale, a sua volta suddiviso in piccoli vortici locali, dotato di spiccate caratteristiche anche da un punto di vista biogeografico.

L'individualità di questi circuiti non ha soltanto riflessi sulla distribuzione delle specie, ma anche sulla distribuzione delle popolazioni, soprattutto pesci, tanto che è possibile distinguere popolazioni del bacino settentrionale, centrale e meridionale, che si comportano distintamente gli uni dagli altri con zone di riproduzione, di accrescimento (*nursery*) e di pascolo precise e frequentate in ben determinati momenti dell'anno. È per questo motivo che gli avannotti di passera, sogliola, orata, branzino ecc., nati sulla costa occidentale dell'Istria in ottobre, novembre e dicembre, seguendo il circuito delle correnti, si trovano a marzo, aprile o maggio nelle acque costiere o nelle lagune di Grado, Marano, Caorle, Venezia, Comacchio, divenute ricchi terreni di pascolo per le nuove leve, con anticipo rispetto al mare.

Già a partire dal 1970, però, si sono incominciate a mettere in evidenza sensibili variazioni dei parametri meteoclimatici suscettibili di influenzare l'idrologia del Golfo di Trieste e dell'Alto Adriatico in generale. Nello stesso periodo, una serie di fenomeni biologici come la ricomparsa massiccia del riccio di mare, la frequente segnalazione e/o il soggiorno nel Golfo di specie di indole meridionale come la medusa urticante (*Pelagia noctiluca*), l'alaccia (*Sardinella aurita*), la comparsa della vespa di mare (*Creseis acicula*l) nell'estate del 1990, la maggior frequenza ed intensità di fenomeni di acque colorate (anni 1975-1985), che rappresentano evidenti episodi di anossia con riflessi anche sulle acque superficiali e morie di organismi bentonici (1983), ecc., sono state considerate risposte biologiche del mare a tali cambiamenti. In tale contesto, l'aumento generalizzato della temperatura del mare di questi ultimi anni ha notevolmente **livellato le stagionalità** caratteristiche dell'Alto Adriatico, determinando un rallentamento delle dinamiche di ricambio delle acque, con conseguente aumento del periodo di soggiorno di quest'ultime nell'intero bacino. L'instaurarsi di un siffatto assetto idrologico ha determinato inizialmente la segnalazione verso Nord di fauna, soprattutto ittica, a carattere spiccatamente termofilo, per cui parecchie specie, rare o scarse fino ad ora, sono più abbondanti mentre si registrano continuamente nuove presenze. Viceversa alcuni stock di specie ad indole tipicamente boreale (passera di mare e papalina), confinate nell'area più settentrionale del bacino, stanno subendo una sensibile rarefazione.

foto 2.6.2 – Estate 2017: la cubomedusa urticante (*Carybdea marsupialis*) ormai è presente ogni estate nelle acque marino costiere e lagunari della nostra regione (foto ARPA FVG)

foto 2.6.3 - Inverno 2009: l'alaccia o sardina africana (Sardinella aurita) è presente nel Golfo di Trieste (foto NIB Piran)

foto 2.6.4 - 1983: anossia sui fondali del Golfo di Trieste e moria degli organismi bentonici (foto M. Stachowitsch)

foto 2.6.5 - Estate 2010: segnalato il pesce coniglio (Siganus luridus) nella Riserva marina di Miramare, specie introdotta attraverso Suez (foto D. Poloniato)

foto 2.6.6 - Estate 2017: il granchio melograno (*Calappa granulata*) di indole subtropicale sta diventando frequente anche nel Nord Adriatico (foto A. Perissinotti)

foto 2.6.7 - 2016: il pesce serra (Pomatomus saltatrix), specie termofila un tempo molto rara, si è stabilito nel Golfo di Trieste e costituisce una delle prede più ambite dalla pesca sportiva (foto D. Borme)

foto 2.6.8 - Estate 2016: catturato il pesce foglia (*Lobotes surinamensis*) nella Laguna di Marano, specie di indole tropicale (foto P. Dal Forno)

Tali considerazioni inducono a pensare che già nel periodo citato, fino ad oggi, le modificazioni climatiche osservate abbiano inciso fortemente non solo nella comparsa di certe specie termofile, ma anche sull'intera struttura trofica del Golfo di Trieste, propaggine settentrionale dell'Adriatico, conferendo ad essa maggiori connotazioni da mare temperato caldo-subtropicale rispetto alle precedenti caratteristiche di mare temperato, e **diminuendo le escursioni stagionali**.

Nel settore della pesca e delle sue risorse, ad esempio, le conseguenze alieutiche legate a questi fatti, specialmente per la **molluschicoltura**, sono individuabili in una minore regolarità delle emissioni periodiche di gameti, in una diminuzione degli accrescimenti medi nel tempo e nella debolezza del bisso nei mitili, a causa del prevalere di tempi di calma del mare, con il conseguente pericolo di perdita del prodotto a seguito delle mareggiate.

Per quanto riguarda le **attività di prelievo**, la diminuita consistenza degli stock ittici può essere determinata, oltre che da constatati fenomeni di sovra pesca, anche da un cambiamento nella struttura del sistema pelagico in cui vengono prese in carico le uova e le larve planctoniche dei pesci. Le variazioni della temperatura del mare, la modificazione del regime dei venti, ecc., influenzano la velocità e la direzione delle correnti che stabiliscono il circuito migratorio delle specie ittiche; pertanto la **deriva larvale** può concludersi in un luogo non adatto a fungere da *nursery* area, oppure nel momento sbagliato, come ad esempio quando la produzione delle specie che fungono da preda per le giovani leve si è già conclusa. Il complesso di fattori ambientali quindi determina, anno per anno, la dinamica degli stock ittici ed i loro equilibri interspecifici, con annate più abbondanti di alcune specie rispetto ad altre.

In un tale scenario si verifica un graduale passaggio da un ciclo di produzione della **pesca tipico di aree temperate**, con due massimi stagionali di produzione annuale ben definiti, ad un ciclo di produzione più simile a quello **subtropicale o tropicale**, in cui la produzione ittica è distribuita piuttosto uniformemente nel corso dell'anno ma con valori sostanzialmente inferiori.

In conclusione, modificazioni climatiche in un senso o nell'altro, oltre a determinare fatti idrologici di per sè degni di attenzione a fini antropici, possono essere all'origine di diversi fenomeni biologici quali:

- **comparsa di nuove specie** animali e vegetali, tra cui cellule algali potenzialmente tossiche per l'uomo, nuovi parassiti e specie invasive;
- **insediamento** a livello di popolazione delle specie un tempo considerate rare o poco frequenti;
- **cambiamenti** generalizzati sulla **struttura** delle comunità pelagiche, bentoniche e demersali.

È evidente, pertanto, che la fisionomia biologica del Golfo di Trieste, dell'Adriatico, e del Mediterraneo in generale, sta cambiando in modo notevole. Questo processo deve essere perciò diligentemente monitorato attraverso opportune ricerche di sufficiente respiro temporale, affinché non se ne faccia oggetto di reazioni emotive.

2.7 Ecosistemi di acque interne e di transizione

L'acqua rappresenta il principale costituente della **biosfera**; ricopre infatti circa il 70% dell'intero globo terrestre in termini di superficie, senza contare la percentuale presente come vapore acqueo nell'atmosfera e quella presente nel sottosuolo. Seppur possa essere considerata una risorsa che si rinnova continuamente, è palese come la sua disponibilità e la sua qualità siano messe sempre più a rischio dalle pressioni operate dall'uomo.

Una situazione ancora più critica riguarda la **biodiversità** legata ai corpi idrici. La **capacità resiliente** degli ecosistemi acquatici, che in vari modi consente ad essi di reagire e sopportare un discreto livello di pressioni, risulta in molti casi ormai compromessa. Conservare l'integrità di un ecosistema acquatico e la qualità delle sue acque risulta di fondamentale importanza anche per i "**servizi ecosistemici**" che esso offre, come ad esempio la capacità di filtrare e diluire le sostanze inquinanti, il contenimento delle alluvioni, il mantenimento delle condizioni microclimatiche e la salvaguardia della biodiversità.

Lago di Ragogna (UD), attualmente monitorato da ARPA FVG ai sensi del D. Lgs. 152/20016

Nella tabella 2.7.1 sono riepilogati i principali macro-impatti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi delle acque interne e di transizione descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto), integrati da alcuni impatti specifici tratti da fonti scientifiche selezionate dai tecnici di ARPA FVG.

tabella 2.7.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sulle acque interne descritti a livello nazionale e riferiti al FVG

TIPOLOGIA di IMPATTO(categorie generali)					IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Ciclo vitale (fenologia)	**Specie aliene/ invasive**	**Distribuzione geografica delle specie**	**Composizione, interazioni, dinamiche delle comunità ecologiche**	**Biodiversità, habitat, ciclo idrologico**			
X		X	X	X	Alterazione del rapporto tra specie vegetali acquatiche con diversa tolleranza alle variazioni di temperatura	L'aumento della temperatura tende a favorire le specie tolleranti, che possono presentare un incremento della durata delle fasi di crescita vegetativa e della produttività, e a sfavorire le specie stenoterme (che non sopportano brusche variazioni di temperatura)	Aumento della temperatura
		X	X	X	Variazioni nella presenza, abbondanza e diffusione di specie vegetali acquatiche legate alle acque fredde in ambienti alpini	Contrazione dell'areale e riduzione delle coperture di specie vegetali legate alle acque correnti fredde (es.*Hydrurus foetidus)* negli ambienti acquatici di alta montagna; possibile scomparsa delle specie nei siti a minor altitudine.	Aumento della temperatura
		X	X		Aumento di specie termofile a scapito di specie microterme di invertebrati	Variazione del rapporto tra entità microterme ed entità termofile all'interno di gruppi tassonomici di invertebrati delle acque dolci (es. possibile colonizzazione di ambienti dominati normalmente da Diamesine da parte di Ortocladiine e Chironomine)	Aumento della temperatura
	X	X	X	X	Comparsa e diffusione di specie aliene	Introduzione e diffusione di specie di piante e animali acquatici con diversa tolleranza climatica	Aumento della temperatura
	X	X	X		Aumento dei Ditteri Simulidi	Aumento dei focolai larvali e degli attacchi da parte degli adulti a uomini e bovini, con possibili rischi socio-sanitari.	Aumento della temperatura
X			X		Modifica del ciclo di vita di insetti legati all'acqua	Variazione dei tempi di sviluppo di specie che svolgono parte del ciclo vitale in acqua, caratterizzate da un periodo di sfarfallamento primaverile/estivo	Aumento della temperatura
		X	X	X	Riduzione e scomparsa dei macroinvertebrati alpini	Riduzione delle popolazioni di macroinvertebrati alpini che vivono in ambienti acquatici alimentati da ghiacciai e manti nevosi.	Aumento della temperatura

TIPOLOGIA di IMPATTO(categorie generali)					IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Ciclo vitale (fenologia)	Specie aliene/ invasive	Distribuzione geografica delle specie	Composizione, interazioni, dinamiche delle comunità ecologiche	Biodiversità, habitat, ciclo idrologico			
X		X	X	X	Alterazione dello stato delle successioni fitoplanctoniche in ambiente lacustre	Alterazione delle successioni fitoplanctoniche sia in termini di biodiversità sia in termini di abbondanze causata dai cambiamenti climatici e da impatti antropici	Aumento della temperatura, variazione delle precipitazioni
				X	Alterazione degli ecosistemi fluviali	Problemi di deflusso minimo vitale ed ecologico, perdita di habitat delle fasce laterali, frammentazione longitudinale e trasversale, aumento delle piene lampo, diminuzione della capacità di laminazione e della capacità tampone biogeochimica	Variazione delle precipitazioni
				X	Riduzione o scomparsa di acque lentiche di piccole dimensioni	Stagni, pozze, paludi, torbiere e acquitrini sono particolarmente sensibili ai cambiamenti climatici per la bassa profondità e le piccole dimensioni. La loro scomparsa implicherebbe una perdita di specie endemiche e relitte, e di una grande varietà di specie, vegetali e animali, che spesso sono gli elementi naturali residui del paesaggio locale.	Variazione delle precipitazioni
				X	Alterazioni degli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee	Le acque sotterranee e i corpi idrici superficiali che ne dipendono (sorgenti, fontanili, corsi d'acqua, laghi carsici e zone umide), ricchi di specie endemiche, risentono dell'alternanza di secche prolungate e piene improvvise e violente. Le secche alterano la connettività verticale tra corpo idrico superficiale e falda, con conseguente perdita di biodiversità.	Variazione delle precipitazioni
				X	Alterazioni degli ecosistemi di transizione marino-costieri	Lagune e foci fluviali sono particolarmente vulnerabili al riscaldamento, all'innalzamento del livello marino e alla variabilità degli apporti d'acqua dolce dei bacini scolanti. Gli impatti attesi sono: aumento del grado di confinamento come conseguenza delle difese idrauliche, ingressione del cuneo salino, maggiore influenza delle piene fluviali di breve durata e forte intensità, marcate variazioni di salinità e temperatura, aumento delle specie invasive, delle fioriture macroalgali e di microalghe tossiche, maggiore incidenza dell'anossia, effetti sulla riproduzione e scomparsa delle specie animali native maggiormente sensibili a vantaggio di quelle esotiche, con possibili impatti anche sulle attività di pesca e acquacoltura.	Aumento della temperatura, variazione delle precipitazioni

In Friuli Venezia Giulia sono già stati registrati diversi macroimpatti relativi agli ecosistemi delle acque interne, che hanno comportato sia una variazione della biodiversità, intesa come **modifica della composizione e della distribuzione geografica delle specie**, che un cambiamento nella condizione idrogeologica, con la conseguente **perdita, riduzione o modifica degli habitat**.

La gran parte di questi impatti riguarda tutto il territorio regionale o ampie fasce dello stesso; fanno eccezione quelli relativi ai corpi idrici lacustri (naturali o artificiali), che insistono su un'area più circoscritta.

I cambiamenti climatici interessano i sistemi fluviali e lacustri principalmente a causa dell'**aumento delle temperature**; questo altera la normale stagionalità delle componenti biologiche anticipando i cicli vitali, favorisce i gruppi che meglio si adattano a temperature più alte e conduce ad una restrizione degli areali delle specie alpine ed inoltre facilita la diffusione di specie aliene, andando indirettamente a modificare gli habitat.

Anche la **variazione delle precipitazioni,** che comporta la ridistribuzione delle piogge e delle portate nel corso delle stagioni e rende più frequenti gli eventi di piena e di magra, colpisce gli organismi di acqua dolce modificandone i cicli biologici. Inoltre l'interazione marcata tra sfruttamento della risorsa idrica sotterranea, inquinamento delle acque e cambiamenti climatici lascia prevedere un'amplificazione degli impatti negativi già in atto sugli ecosistemi che dipendono dalle acque sotterranee (es- fontanili, corsi d'acqua di risorgiva).

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag.34
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag.299-317
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag.54-68

Altre fonti consultate:

- Leo Rivosecchi (2005)-*Paesaggio e attacco massivo di Ditteri Simulidi all'uomo e ad animali domestici.* Ann Ist Super Sanità ;41(3):415-419
- Krizmanić J., Subakov-Simić G., and Karadžić V. *(2008) Supplementary notes on the distribution of Hydrurus foetidus (Vill.) Trevisan (Chrysophyta) in Serbia*. Arch. Biol. Sci., Belgrade, 60 (2), 13-14.
- https://www.usgs.gov/news/small-alpine-insects-are-big-messengers-climate-change?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products

FOCUS Effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi delle acque interne

Arianna Macor, Gabriele Piazza, Erica Rancati, Alessandra Sinesi, Damiano Virgilio, Elisa Zanut, Raffaella Zorza
S.O.C. Stato dell'ambiente - ARPA-FVG - S.O.S. Qualità acque interne

L'importanza del clima risiede nel suo fondamentale ruolo come **determinante delle condizioni di vita**, principalmente a causa della sua sostanziale influenza sugli ecosistemi e le loro caratteristiche.

Considerando strettamente le comunità biologiche, il clima – inteso semplicisticamente come *range* di temperature e/o precipitazioni – risulta essere il principale fattore che controlla, a livello globale, i modelli di sviluppo vegetazionali e la conseguente distribuzione delle popolazioni animali.

Gli attuali ed estesi mutamenti del clima, che influenzano direttamente ed indirettamente i valori estremi ed i valori medi tipici delle sue variabili (es: temperatura, piovosità, umidità, ecc.), unitamente alle attività umane che possono influenzare tali alterazioni, possono agire determinando impatti sull'intero pianeta e su tutti gli ecosistemi.

Sorgiva di Bars (Osoppo, UD)

Per quanto riguarda specificatamente le problematiche generate dalle variazioni del clima sugli ecosistemi di acqua dolce superficiali interni europei, le principali conoscenze e serie storiche di confronto riguardano maggiormente le variazioni di flusso e di portate in atto, grazie alla presenza di una fitta rete di stazioni idrometriche presente nel territorio europeo (Slater e Wilby, 2017). Il risultato a livello globale è che i cambiamenti climatici hanno un chiaro effetto sull'**andamento stagionale delle portate,** principalmente nel naturale *trend* delle piene (in anticipo o in ritardo rispetto alla naturale stagionalità) e del flusso. Questo effetto, esteso ad un'area così ampia, non può essere esclusivamente ricondotto a dei fenomeni locali, quali il cambio dell'uso del suolo o interventi negli alvei dei fiumi

(captazioni idriche, arginature, briglie, etc), bensì a fenomeni estesi e globali come i cambiamenti climatici. Secondo tali studi inoltre (Van Vliet et al., 2016), l'impatto del cambio climatico sui fiumi e sui corsi d'acqua non sta modificando soltanto il flusso, ma anche le **caratteristiche termiche delle risorse idriche**. La temperatura è un ulteriore parametro che evidenzia l'impatto dei cambiamenti climatici poiché può portare ad un aumento dell'evaporazione dell'acqua dei fiumi, a cui può essere correlato un **aumento della concentrazione dei livelli di contaminazione** che già esistono in essi.

Dal punto di vista biologico, l'effetto più evidente è che i cambi climatici stanno favorendo **l'invasione di specie di latitudini più calde;** nel mar Mediterraneo. Per esempio, negli ultimi anni si sta assistendo alla invasione di diverse specie di alghe caratteristiche di mari caldi dell'America, dell'Africa e dell'Asia, giunte probabilmente attraverso le acque di zavorra delle navi. Queste specie, che minacciano l'esistenza delle specie animali e vegetali autoctone, si vedranno favorite dall'aumento di temperatura che comporterà il cambio climatico nelle prossime decadi. È prevedibile che un simile fenomeno possa manifestarsi anche nei sistemi dulciacquicoli, con la diffusione di specie alloctone introdotte nell'ambiente attraverso diverse vie (siano esse di tipo antropico o naturale) e la riduzione delle presenza di specie autoctone. I cambiamenti climatici possono esacerbare l'impatto delle specie alloctone incrementando il loro potenziale riproduttivo. Gli ecosistemi di acqua dolce risultano particolarmente suscettibili all'invasione di specie non indigene; i cambiamenti climatici possono svincolare alcune specie dagli attuali limiti di temperatura, aumentando così le loro tendenze invasive (Clarke, 2009).

È inoltre da considerare che la fusione delle calotte di ghiaccio polari, conseguente all'innalzamento delle temperature, ha già comportato l'innalzamento del livello del mare e quindi una **variazione del regime di flusso a livello delle foci dei fiumi.** Tale fenomeno, oltre a determinare **variazioni di salinità** delle porzioni terminali dei corsi d'acqua in tratti di lunghezza sempre maggiore, ed impattare quindi sulle specie stenoaline, influisce in modo rilevante anche sugli eventi di deposizione e sulle migrazioni delle specie anadrome e catadrome[4] e, in generale, sulle **dinamiche ecologiche delle biocenosi acquatiche**.

Attualmente sul territorio regionale non esistono evidenze degli effetti dei cambiamenti climatici a livello ecosistemico, anche a causa delle **numerose pressioni che, in maniera sinergica, concorrono ad alterare lo stato di un corpo idrico,** rendendo così difficile il discernimento delle alterazioni generate da ciascuna di esse.

La disponibilità di dati raccolti nel corso di lunghi periodi può però restituire informazioni importanti riguardo all'evoluzione delle comunità biologiche ed alla distribuzione dei diversi taxa, permettendo forse nel tempo di individuare eventuali conseguenze di tali cambiamenti.

Dal 2009 ARPA FVG svolge un'attività di monitoraggio biologico su un grande numero di corsi d'acqua (naturali e artificiali) e sui principali laghi/invasi presenti sul territorio regionale. I dati biologici vengono raccolti ai fini della valutazione dello stato ecologico dei corpi idrici regionali (ai sensi della Direttiva Europea Quadro Acque 2000/60) ed interessano principalmente comunità acquatiche (vegetali e animali). Tra i vari siti attualmente monitorati vi sono anche alcuni esenti da pressioni, e quindi potenzialmente utilizzabili ai fini di una identificazione più certa degli effetti dei cambiamenti climatici a lungo termine, siano essi intesi come semplice alterazione delle condizioni chimico-fisiche, o come modificazioni che interessano gli ecosistemi, la composizione delle comunità e/o gli areali di

[4] Specie anadrome: nascono nei fiumi e poi soggiornano per anni nel mare, dove si sviluppano. Poi migrano di nuovo verso i fiumi di origine per riprodursi. Specie catadrome: nascono in mare e poi si portano verso i fiumi dove si sviluppano prima di ritornare in mare per la riproduzione.

distribuzione di alcune specie. Ad oggi non è ancora possibile trarre alcuna deduzione in quanto la serie temporale di dati disponibili non è sufficiente a tracciare dei trend o evidenziare gli effetti dei cambiamenti climatici.

Bibliografia:

Clarke S.J. (2009) Adapting to climate change: implications for freshwater biodiversity and management in the UK. Freshwater Review, 2(1): 51-64.

Slater L.J., Wilby R.L. (2017). Measuring the changing pulse of rivers. Science, 357, (351): 552.

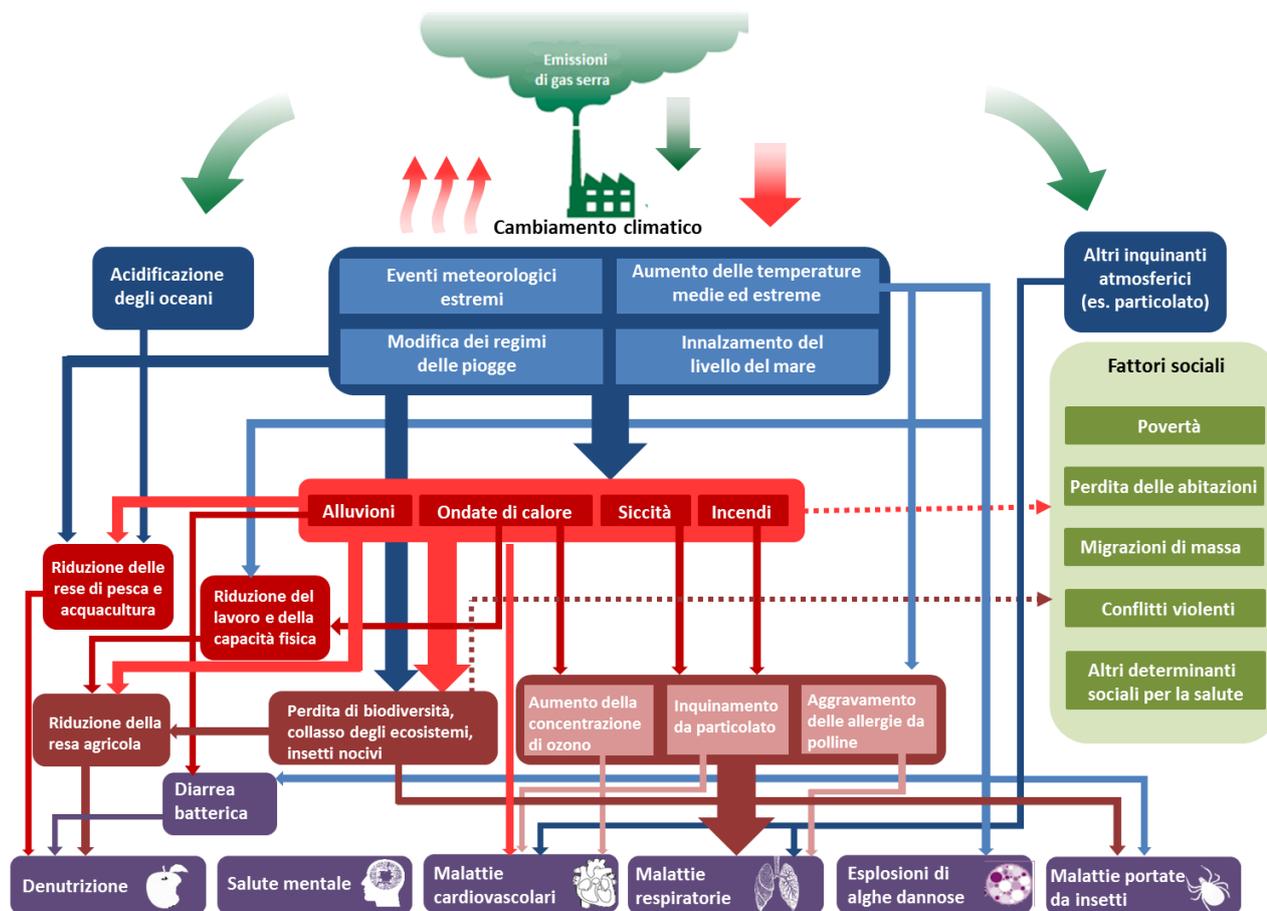
Van Vliet M.T.H., Wiberg D, Leduc S, Riahi K. (2016). Power-generation system vulnerability and adaptation to changes in climate and water resources. Nature Climate Change, 6:375-380.

2.8 Salute

I cambiamenti climatici possono riguardare in maniera importante la nostra salute, incidendo sia sul nostro **stato fisico e di benessere psicologico**, che sulla nostra **sicurezza** (basti pensare agli effetti degli eventi meteorologici intensi in termini di incolumità e reazione emotiva).

Oltre ai danni **diretti** generati dalle ondate di calore e di gelo e dall'aumento della frequenza degli eventi meteorologici estremi, come alluvioni, temporali forti e trombe d'aria, vanno considerati anche gli impatti di tipo **indiretto**, ovvero quelli derivanti dagli effetti dei fattori meteoclimatici sugli ecosistemi e sullo stato delle acque, del suolo e dell'aria *indoor* e *outdoor*.

In fig. 2.8.1 è ben rappresentata la complessità delle relazioni tra cambiamenti climatici e impatti diretti e indiretti sulla salute umana.

fig. 2.8.1 – Panoramica dei collegamenti tra emissioni di gas serra, cambiamenti climatici salute (tradotto e rielaborato da Watts et al., 2015).

Nella tabella 2.8.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sulla salute descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

Tab. 2.8.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sulla salute descritti a livello nazionale e riferiti al FVG

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)				IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Salute e stato fisico	Stili di vita	Sicurezza (stradale, alimentare, sul lavoro)	Costi socio-economici			
X	X		X	**Aumento delle patologie legate alle alte temperature (asma e infarto miocardico acuto) e alla radiazione solare**	Aumento dei casi e della gravità di patologie legate ad un eccesso di calore e ad una elevata esposizione ai raggi UV, anche a causa dell'aumento del tempo trascorso all'aria aperta e degli effetti dovuti agli inquinanti atmosferici, come l'ozono. Aumento di stati di malessere e disagio.	Aumento delle temperature massime estive e delle ondate di calore, aumento di intensità dei raggi UVB
X	X	X		**Aumento dei rischi dovuti a frane, incendi ed eventi meteorologici estremi**	Aumento dei traumi, disagi, disturbi psichici e costi connessi ai danni da fenomeni meteorologici avversi (alluvioni, tempeste, trombe d'aria, incendi) e delle loro conseguenze (frane, mareggiate, caduta di alberi e rami). Effetti indiretti derivanti dall'interruzione temporanea delle cure sanitarie e dalla necessità di spostamento dalla propria casa.	Aumento delle temperature, aumento della frequenza degli eventi meteorologici estremi
X	X			**Aumento delle patologie allergiche respiratorie (asma)**	Aumento della concentrazione e sensibilizzazione ai pollini a causa dell'allungamento della stagione pollinica, la comparsa di nuove specie allergeniche, la presenza di inquinanti, i cambiamenti di umidità, lo stress osmotico prodotto dai temporali, e i cambiamenti della circolazione atmosferica.	Aumento delle temperature, variazione dei valori di umidità relativa, aumento della frequenza degli eventi meteorologici estremi
X	X	X	X	**Aumento delle patologie trasmesse da vettori artropodi**	Estensione a quote più elevate e latitudini più settentrionali dei vettori di malattie esotiche o endemiche, e aumento dell'incidenza delle infezioni dai virus da essi trasmessi (es Dengue, febbre Chikungunya, malattia da virus West Nile, malaria, TBE, malattia di Lyme).	Aumento delle temperature, variazione dei valori di umidità relativa, variazione della piovosità
X		X		**Aumento del rischio di esposizione a contaminanti chimici**	Aumento del rischio di esposizione a contaminanti chimici presenti negli alimenti e per i lavoratori del settore agricolo a causa dell'aumento nell'uso di trattamenti fitosanitari e fertilizzanti.	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni
X		X		**Compromissione della sicurezza alimentare**	Compromissione della sicurezza di alimenti e mangimi per l'accumulo di prodotti fitosanitari per la protezione delle piante o micotossine.	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni

	X			**Compromissione della disponibilità e qualità alimentare ed aumento dei costi**	Compromissione della produttività agricola a causa di variazioni nella stagionalità delle colture, modifiche alle aree idonee parassitosi delle piante, con riduzione della disponibilità di alcuni alimenti e calo della qualità nutrizionale di alimenti fondamentali in termini di vitamine, antiossidanti e minerali. Aumento dei prezzi dei prodotti agroalimentari a fronte di maggiori costi fitosanitari da sostenere e alle perdite produttive e quindi diminuzione dell'accessibilità di alcuni alimenti per fasce della popolazione economicamente svantaggiate	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni, aumento della frequenza e intensità degli eventi estremi
			X	**Aumento dei costi di prestazioni ambientali e sanitarie**	Aumento dei costi legati al monitoraggio ambientale e alla sorveglianza epidemiologica umana e veterinaria	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni
			X	**Aumento dei costi in ambito lavorativo**	Aumento dei costi socio-economici correlati all'aumento dei casi di malattia, ricovero e mortalità, al calo di produttività e alla perdita di giorni lavorativi..	Aumento delle temperature massime estive e delle ondate di calore
X		X		**Aumento del rischio di tossinfezioni alimentari**	Aumento dei casi di malattie causate dalla contaminazione degli alimenti a seguito di eventi alluvionali, dall'esposizione nella filiera di conservazione, distribuzione e stoccaggio a temperature più elevate e da comportamenti sociali più a rischio come l'uso della ristorazione pubblica e di buffet con cibo esposto a temperature ambiente.	Aumento delle temperature, aumento della frequenza e intensità degli eventi estremi
X		X		**Aumento delle infezioni trasmesse con l'acqua**	Aumenta il rischio di contrarre malattie attraverso il consumo di acqua contaminata da una più alta concentrazione di batteri, virus e protozoi parassiti a causa dello straripamento degli impianti di trattamento e il trasporto di deiezioni animali e umane o la mobilizzazione di sedimenti contaminati.	Variazione delle precipitazioni, aumento delle temperature forti piogge e alluvioni, maggiore stratificazione dei bacini e siccità
X	X	X		**Aumento delle fioriture di alghe tossiche e di organismi urticanti**	Aumento degli episodi di fioriture algali marine di specie tropicali, alcune delle quali producono tossine che possono accumularsi in molluschi o a cui l'uomo può essere esposto durante le attività ricreative, l'ingestione accidentale di acqua durante la balneazione o l'aerosol contaminato. Aumento della presenza di meduse e del relativo rischio di irritazioni cutanee per i bagnanti	Aumento delle temperature
X	X	X		**Peggioramento delle prestazioni dei servizi idrici**	Aumento delle interruzioni nella fornitura per danneggiamenti agli impianti o carenza idrica, peggioramento nella qualità dell'acqua ad uso potabile a causa di contaminazioni chimiche o microbiologiche.	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni
	X		X	**Cambiamento del comfort microclimatico negli ambienti interni**	Aumento dei fattori di rischio per la salute per il raggiungimento di temperature non confortevoli nel periodo estivo e l'aumento dei livelli di umidità e della proliferazione di muffe. Miglioramento del livello di comfort in inverno.	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni

L'aumento delle temperature estive e delle ondate di calore può aumentare il rischio di **insolazioni, colpi di calore, scottature ed eritemi**, ma anche portare ad un aggravamento delle patologie psichiche e cardio-respiratorie, e dei danni da esposizione ai raggi UV, quali tumori cutanei, patologie oculari (cheratiti, cataratte precoci) e alterazioni del sistema immunitario. Le persone più esposte a questo genere di impatti sono bambini, anziani, le persone affette da alcune malattie croniche (diabete, malattie cardiache, respiratorie e renali) e le categorie professionali che lavorano all'aria aperta.

Tra le conseguenze degli eventi meteorologici avversi, quelle che si verificano con maggiore probabilità sono le **alluvioni e le inondazioni**. Questi eventi, che a causa dei cambiamenti del clima potrebbero diventare sempre più frequenti, determinano non solo un aumento dei decessi e dei ricoveri per ferite, gastroenteriti o avvelenamenti, ma possono provocare anche attacchi cardiaci, aggravare le condizioni cliniche delle persone affette da patologie croniche in seguito ad una momentanea interruzione delle cure mediche e, a più lungo termine, indurre cardiomiopatie e disturbi post-traumatici da stress.

I cambiamenti climatici, in particolare i loro effetti sullo **stato di suolo, aria e acqua,** possono condizionare in maniera indiretta sia lo **stato delle patologie respiratorie**, sia la **diffusione di infezioni** e la **sicurezza della produzione alimentare**.

I cambiamenti climatici inoltre favoriscono la **diffusione delle infezioni trasmesse da vettori biologici** (cioè di organismi animali che trasmettono malattie) come la Zanzara tigre, il flebomo della leishmania e la zecca, determinandone l'introduzione in aree generalmente esenti, in molti modi. In primo luogo, l'aumento delle temperature minime in inverno e nelle ore notturne fa diminuire in maniera decisiva la mortalità dei vettori; in secondo luogo, l'anticipo delle primavere aumenta i loro tassi di riproduzione e ne prolunga la stagione di attività. Si allargano anche le aree soggette al rischio d'infezione, dato che, con l'aumento delle temperature, si spostano a quote e latitudini più elevate i vettori ma anche i loro serbatoi biologici (roditori, ungulati alpini ma anche animali da pascolo nel caso delle zecche). Con le temperature più elevate, inoltre, aumentano sia il tasso di punture delle zanzare, sia il tasso di sviluppo del patogeno da esse trasportato. Tutti questi fattori favoriscono la diffusione di patologie come l'encefalite da zecca e la malattia di Lyme, o la comparsa di virus "esotici".

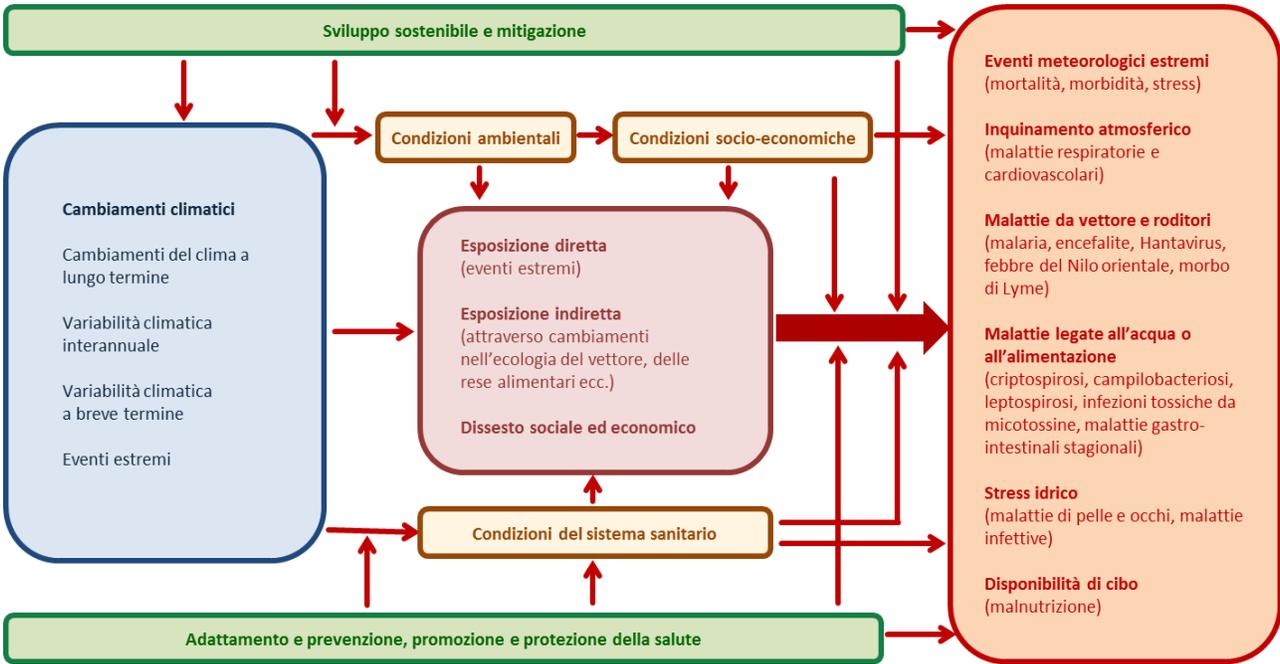
La **zanzara tigre** (*Aedes albopictus*), individuata in Italia per la prima volta a Genova nel 1990, è capace di trasmettere alla fauna ben 22 virus diversi. Tra questi vi sono **agenti infettivi** pericolosi anche per l'uomo, come per esempio i virus di Dengue, la Chikungunya, che ha causato in Emilia-Romagna la prima epidemia in una regione temperata, e il West Nile Virus. Altre specie di zanzara stanno inoltre invadendo il nostro paese a un ritmo incalzante.

Le **zecche** *(Ixodes ricinus*, la cosiddetta zecca dei boschi, e *Ixodes persulcatus*) sono in espansione sia in Europa che in Italia, come pure le patologie da esse veicolate. Sono molto pericolose perché possono operare sia come vettori che come serbatoi dell**'encefalite da morso di zecca TBE** (*Tick Borne Encephalitis*- o meningoencefalite da zecche) e del batterio Borrelia burgdorferi s.l., agente della **malattia di Lyme** o borreliosi.

La TBE è una malattia virale acuta del sistema nervoso centrale causata da un *arborvirus* appartenente al genere *Flavivirus*, che è molto simile ai virus responsabili della febbre gialla e della dengue. È considerata una malattia emergente e alcuni studi hanno dimostrato una stretta correlazione tra l'espansione temporale e-spaziale dei suoi vettori e i cambiamenti climatici. Il virus trasmesso dalle zecche infetta diversi animali sia domestici che selvatici, che contribuiscono al mantenimento del ciclo di trasmissione dell'infezione e che, con l'aumento delle temperature, trovano condizioni a loro favorevoli a quote o latitudini sempre più elevate. In Italia la TBE è stata identificata per la prima volta nel 1994 in provincia di Belluno; in Friuli Venezia Giulia i primi casi sono comparsi nel 2003 e al 2016 i casi segnalati sono stati 87, di cui 3 invalidanti e 3 con esito letale (dati Regione FVG).

La zecca Ixodes ricinus è il vettore anche della Borrelia burgdorferi s.l., che è l'agente della **malattia di Lyme o borrelios**. Questa patologia, se non curata nelle fasi iniziali, può progredire e cronicizzare causando seri danni alle articolazioni, al sistema nervoso, al cuore e ad altri organi. In Italia, per la malattia di Lyme i centri endemici storici di borreliosi sono Veneto, Friuli Venezia Giulia e Trentino.

È sempre più evidente come tutti questi diversi impatti, diretti e indiretti, siano tra loro interconnessi e chiamino in causa politiche climatiche, di sostenibilità e di prevenzione ambientale e sanitaria (fig. 2.8.2).

fig. 2.8.2 - Impatti e rischi per la salute dovuti ai cambiamenti climatici: il quadro d'insieme (EEA, 2012). Traduzione a cura di ARPA FVG – OSMER.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 36
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 330-374
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 323-344

Altre fonti consultate:

- http://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/salute-sociale/zecche/
- http://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/salute-sociale/zecche/allegati/TBE_FVG.pdf
- Watts, N, Adger, WN, Agnolucci, P et al. (2015)- *Health and climate change: policy responses to protect public health. Lancet*; 386: 1861–1914
- EEA (2012) - *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2012* (Pag. 184 - Figure 4.5 Impact pathways of climate change on human health - Source: Wolf, 2011, adapted from Confalonieri et al., 2007), ripresa da MATTM (2014), Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia.

2.9 Foreste

I documenti nazionali (SNACC e PNACC) dedicano specifici capitoli agli impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste, considerandone in particolare, oltre agli aspetti biologici ed ecologici, la funzione produttiva e i diversi “servizi ecosistemici” che i boschi offrono, aspetti di grande rilevanza sia a livello nazionale che in Friuli Venezia Giulia.

Secondo l’INFC (Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi nazionali di Carbonio), la superficie forestale nazionale è pari a quasi 10 milioni e mezzo di ettari e occupa circa il 35% del territorio nazionale, distribuita soprattutto in Alto Adige, Trentino, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Toscana, Umbria, Abruzzo, Calabria e Sardegna (Gasparini and Tabacchi, 2011). Questa enorme superficie contribuisce ad assorbire circa 35 milioni di tonnellate di CO_2 l’anno. Oltre al loro importante contributo alla **mitigazione delle emissioni di anidride carbonica** e alla **funzione produttiva** (Levers et al., 2014; Luyssaert et al., 2010), le foreste svolgono un ruolo insostituibile anche in ambiti sensibili come la **protezione del suolo** (Panagos et al., 2015), la mitigazione del **dissesto idrogeologico**, la regolazione del ciclo dell’**acqua**

(Makarieva et al., 2009) e la conservazione del **paesaggio** e della **biodiversità** (Liang et al., 2016). Sono stati inoltre introdotti **nuovi utilizzi** per le attività turistico-ricreative (i parchi-avventura forestali), sportive, di didattica ambientale, di valorizzazione e culturali (musei e concerti in foresta), che hanno spesso delle ricadute positive sul reddito e sull'occupazione locale.

I cambiamenti climatici provocano delle **alterazioni significative al patrimonio forestale**, compromettendo anche la funzionalità dei boschi e i servizi ecosistemici che essi offrono (Mina et al., 2017).

Le foreste subiscono infatti sia gli **effetti diretti** delle variazioni climatiche (aumento delle temperature, della siccità estiva, degli eventi estremi) che quelli **indiretti** connessi ad altri processi potenzialmente modulati dai cambiamenti climatici, come la competizione interspecifica, i cambiamenti di uso del suolo, gli incendi, le deposizioni azotate (Seidl et al., 2017). Innanzitutto il *climate change* induce cambiamenti nei tassi di crescita e nella produttività forestale (Ciais et al., 2008, 2005; Jung et al., 2010; Reichstein et al., 2007; Zhao e Running, 2010), eleva in altitudine e latitudine gli habitat (Grace, 2002; Handa et al., 2006; Harsch et al., 2009), cambiando così la composizione boschiva (Hanewinkel et al., 2012), e porta ad una perdita locale di biodiversità. L'aumento del rischio di incendi e dei danni provocati da insetti e patogeni, come pure l'alterazione del ciclo dell'acqua e del carbonio, portano poi all'indebolimento delle piante e determinano perciò perdite nella superficie forestale (Elkin *et al.*, 2013; Seidl et al., 2017, 2010).

Gli **incendi boschivi** rappresentano inoltre una notevole fonte di CO_2 e di gas a effetto serra. Le emissioni da incendi boschivi in Italia corrispondono a una media di circa 6 Mt di CO_2 all'anno per il periodo 1990-2009 e influenzano non solo la qualità dell'aria e la salute umana (Knorr *et al.*, 2016), ma anche il budget atmosferico e il ciclo del carbonio a scala globale; inoltre proiezioni future indicano un aumento di tali eventi devastanti che, con la riduzione della piovosità estiva e l'aumento della mortalità boschiva, diventeranno sempre più frequenti ed estesi (Mouillot *et al.,* 2002).

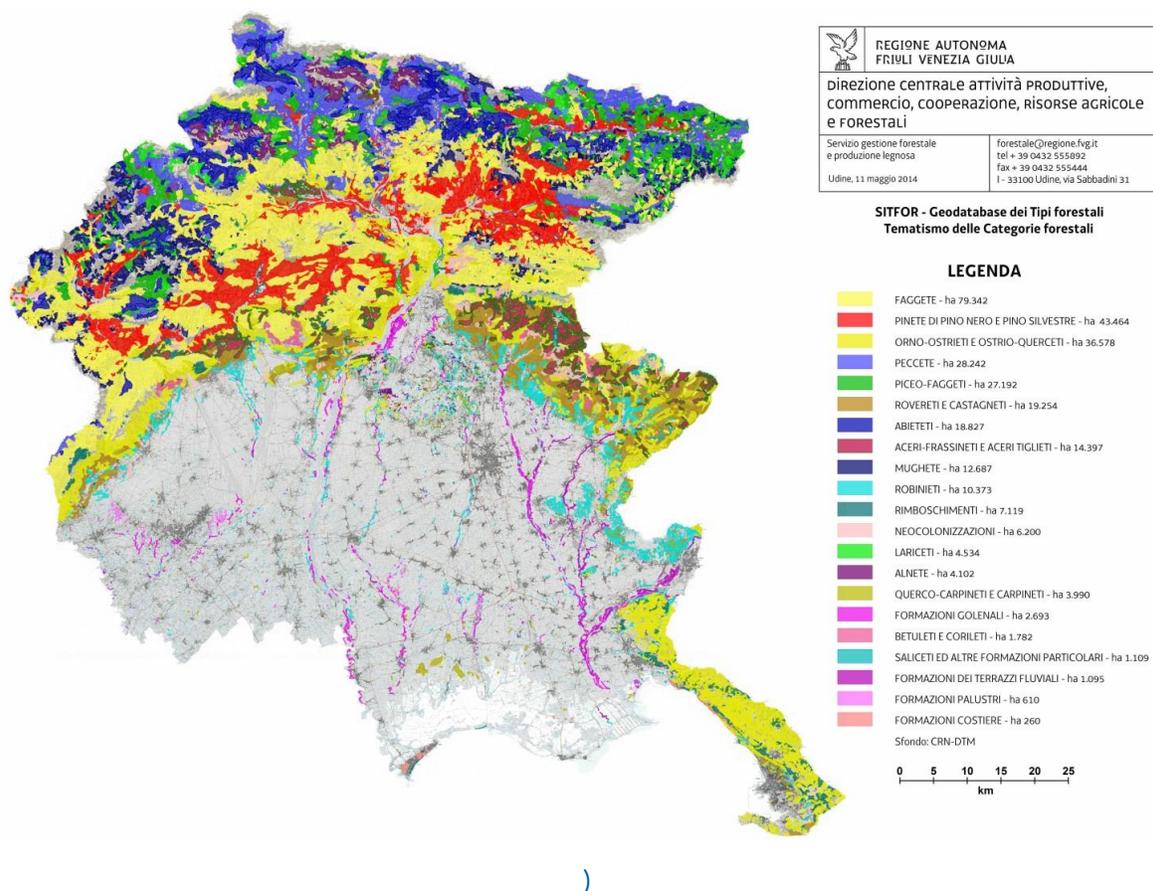
Nella tabella 2.9.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste descritti nella Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNACC) e nei relativi documenti preparatori.

tab. 2.9.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste descritti a livello nazionale e riferiti al FVG

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)				IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Biodiversità	Produttività forestale	Protezione suolo	Altri servizi ecosistemici e utilizzi			
X	X			**Alterazioni dei tassi di crescita e della produttività**	Riduzioni di tassi di crescita e produttività negli ecosistemi mediterranei e aumenti nelle zone del nord Italia e montane	Aumento delle temperature, variazioni della piovosità, maggiore frequenza delle ondate di calore
X			X	**Riduzione del numero di specie arboree e variazioni nella composizione dei boschi**	Contrazione delle specie arboree presenti e aumento relativo delle specie arbustive o più termofile e xeroresistenti rispetto a quelle più esigenti di umidità. Condizioni di temperatura e CO_2 favorevoli per la proliferazione delle foreste di abete rosso e bianco.	Aumento delle temperature, variazioni della piovosità, maggiore frequenza delle ondate di calore
X	X		X	**Riduzione degli habitat con conseguenze sulla riproduzione**	Possibili processi di asincronia riproduttiva e di frammentazione degli habitat con conseguenze sulla diversità genetica a scala di popolazione. Al margine meridionale dell'areale le specie forestali potrebbero subire una progressiva perdita di habitat.	Aumento delle temperature, variazioni della piovosità
X			X	**Espansione di specie aliene legnose ed erbacee**	Condizioni favorevoli a specie originarie di altre aree climatiche (tropicale o semiarida) che possono mettere a rischio le biocenosi forestali. Possibili processi di immigrazione di specie del piano mediterranee. Conseguenti variazioni del paesaggio.	Aumento delle temperature, variazioni della piovosità
		X		**Riduzione della capacità di protezione dei terreni dal rischio idrologico**	Indebolimento dei processi di intercettazione della precipitazione, evapotraspirazione e infiltrazione, e di protezione contro gli agenti erosivi.	Aumento delle temperature, variazioni della piovosità, aumento degli incendi
X	X			**Maggiore perdita di superficie forestale**	Mortalità dovuta a situazioni ricorrenti di siccità e ondate di calore, aumento della vulnerabilità all'attacco di patogeni e malattie, maggiore incidenza e violenza di incendi e frane, aumento della respirazione e riduzione delle riserve energetiche necessarie a sostenere i periodi di siccità.	Aumento delle temperature, variazioni della piovosità, aumento della frequenza degli eventi estremi
X	X	X	X	**Allungamento della stagione vegetativa**	Allungamento della stagione vegetativa in Europa a seguito dell'aumento della temperatura media: anticipazione media della primavera/estate di 2.5 giorni per °C; ritardo nell'imbrunimento delle foglie di 1.0 giorno per °C	Aumento delle temperature

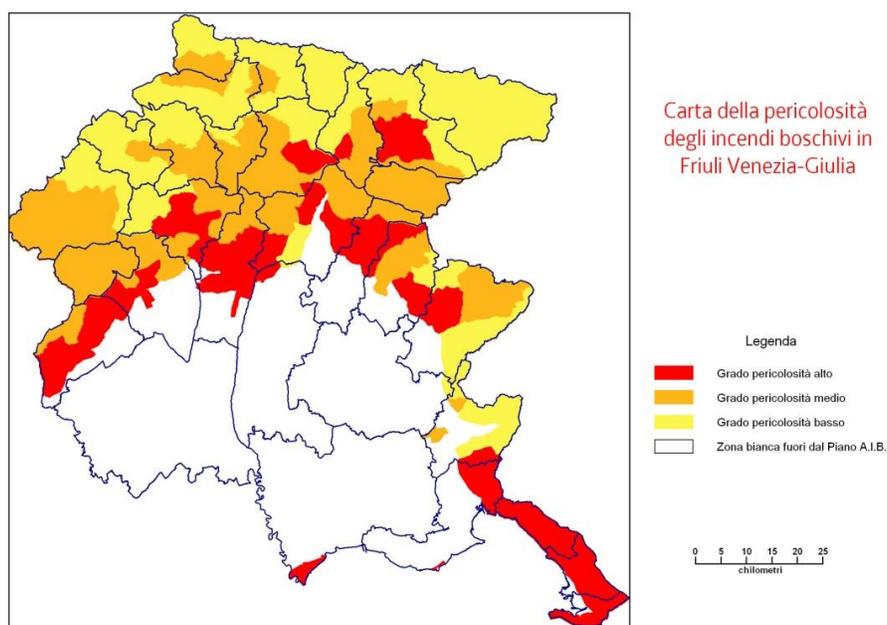
In generale gli impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste sono e saranno più rilevanti nelle aree mediterranee e negli ambienti d'alta quota (Lindner et al., 2010), contesti ambientali entrambi ricompresi nel territorio del **Friuli Venezia Giulia**.

fig. 2.9.1. – Carta regionale delle categorie forestali (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2014)

)

In regione la superficie boschiva occupa 300 mila ettari, di cui circa il 93% è situato in montagna e il 7% in pianura, ed è costituita da una straordinaria **varietà di tipologie forestali** (fig. 2.9.1) che si susseguono dalla fascia costiera e quella alpina: dalle formazioni a carattere illirico –mediterraneo della costiera triestina caratterizzate da carpino nero e leccio ai residui dei boschi planiziali a carpino bianco e farnia nella bassa pianura friulana; dalle diverse formazioni a carpino nero, orniello e roverella che ricoprono le pendici prealpine esposte a sud e gran parte del Carso, ai rovereti, castagneti, aceri-tiglieti e aceri-frassineti che, a seconda delle situazioni, si ritrovano nelle aree collinari e prealpine; dalle pinete a pino nero e silvestre, alle faggete, ai boschi di abete rosso e abete bianco che, con tutta una serie di tipologie intermedie caratterizzate dalla prevalenza o copresenza delle diverse specie, coprono gran parte dell'area montana, per giungere a formazioni meno diffuse e legate a condizioni peculiari come i lariceti. Sotto il **profilo economico**, i boschi della regione rappresentano un patrimonio di quasi 45 milioni di metri cubi di legname, con una crescita annua di circa 1 milione di metri cubi, che dà lavoro a 110 imprese forestali (dati 2012, fonte Regione autonoma Friuli Venezia Giulia).

È quindi ragionevole immaginare che gli impatti dei cambiamenti climatici sul patrimonio forestale regionale saranno diversificati a seconda dei diversi contesti geografici e ambientali e delle diverse tipologie di boschi, ma andranno comunque a toccare aree di interesse che coinvolgono diversi settori: dalla conservazione della natura al paesaggio, dalla filiera della lavorazione del legno al turismo, dalla salute alla protezione del suolo e alla prevenzione del dissesto idrogeologico.

Un problema già molto rilevante in regione, che potrà aggravarsi con i cambiamenti climatici, sono gli **incendi boschivi**: alla pericolosità già nota (fig. 2.9.2) si somma ora l'aggravarsi degli incendi estivi provocati da fulmini, come evidenziato nel focus *Evoluzione del fenomeno degli incendi boschivi nell'area montana del Friuli Venezia Giulia come conseguenza dei cambiamenti climatici in corso*.

fig. 2.9.2 - Carta della pericolosità degli incendi boschivi in FVG (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia)

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulla **produttività di alcune specie forestali** sono approfonditi nel caso studio *"Impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste: effetti sull'accrescimento di piceo-abieteti della Val Pesarina"*.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 51-52
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 695-709
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali* (versione di Luglio 2017) – pag. 347-375

Altre fonti consultate:

- www.sian.it/inventarioforestale
- http://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/economia-imprese/agricoltura-foreste/foreste/
- http://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/economia-imprese/agricoltura-foreste/foreste/FOGLIA202/allegati/Tipi_forestaliMAG2014.jpg
- http://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/economia-imprese/agricoltura-foreste/foreste/allegati/carta_della_Pericolositx.jpg

Vedi anche caso studio:

3.8: *Impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste: effetti sull'accrescimento di piceo-abieteti della Val Pesarina*
3.9 *Impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste: eventi di disseccamento e mortalità degli alberi a seguito di episodi di aridità*

FOCUS I servizi ecosistemici forniti dalle foreste

Giorgio Alberti - Dipartimento di Scienze agroalimentari, ambientali e animali, Università degli Studi di Udine

Secondo la classificazione fornita dal Millennium Ecosystem Assessment (MEA, 2005), i servizi forniti dalle foreste possono essere distinti in:

a. servizio di **fornitura di beni**. Il bosco fornisce: alimenti (frutti e carni) acqua, legno per costruzioni e per combustibile e numerosi altri beni materiali;

b. servizi di **regolazione**. Il bosco svolge un ruolo nella regolazione del clima, del deflusso delle acque e della loro qualità, della presenza e diffusione di polveri, dell'inquinamento acustico. Il bosco condiziona la vita dell'uomo agendo sull'ambiente fisico e biotico;

c. servizi **culturali**. Il bosco costituisce uno spazio per il godimento del tempo libero e per un sano esercizio fisico, un elemento estetico del paesaggio, una testimonianza della storia del territorio; si tratta di benefici non materiali che contribuiscono all'arricchimento spirituale, allo sviluppo della conoscenza e della riflessione, oltre che alla ricreazione.

La disponibilità di questi servizi è resa possibile dallo svolgimento di tutte le funzioni dell'ecosistema e dalla conservazione della biodiversità che supportano la produzione primaria, la formazione del suolo e il ciclo degli elementi (servizi di **supporto**). La loro azione sull'umanità, a differenza delle precedenti tre categorie di serivizi, è quindi indiretta. Le "esigenze di singoli e delle comunità" non sono mai limitate ad un solo bene o servizio; si parla di **uso multiplo** del bosco come "una modalità di gestione forestale finalizzata ad ottenere beni e servizi diversi in modo durevole senza conseguenze nocive sull'ambiente" (Nyland2002).

FOCUS Evoluzione del fenomeno degli incendi boschivi nell'area montana del Friuli Venezia Giulia come conseguenza dei cambiamenti climatici in corso

Flavio Cimenti – Ispettore del Corpo Forestale Regionale, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia

I cambiamenti climatici in corso nell'ultimo ventennio determinano effetti più marcati a livello di arco alpino rispetto alle altre zone dell'Italia. Nella regione Friuli Venezia Giulia il fenomeno degli incendi è sicuramente quello che maggiormente ha risentito delle variazioni di temperatura e regime pluviometrico che hanno interessato diverse estati dell'ultimo periodo.

L'Anticiclone africano, figura barica quasi sconosciuta nella nostra Regione fino ad una ventina di anni fa, è diventata ora la situazione meteorologica di riferimento per lunghi periodi dell'anno ed in particolare durante le stagioni estive. Gli effetti sono lunghi periodi con elevate temperature e assenza di precipitazione che rendono particolarmente suscettibile agli incendi vaste aree della montagna friulana caratterizzata da rocce calcaree, morfologie molto accidentate su cui si insediano formazioni forestali caratterizzate prevalentemente da Pino nero e Pino silvestre con alternanza a latifoglie termofile quali Carpino nero ed Orniello (figura 2.9.1).

La naturale conclusione di questi potenti anticicloni di matrice africana avviene di frequente per inserimento di sacche di aria più fredda provenienti dalle latitudini più a nord, chiamate volgarmente "gocce fredde", che determinano nella montagna friulana repentini cambi di temperatura, temporali con forte attività elettrica e piogge anche di rilievo ma distribuite non uniformemente sul territorio. Lo scambio di masse d'aria lungo i meridiani determina un'intensa attività elettrica a livello atmosferico che provoca nella regione Friuli Venezia Giulia la caduta al suolo di una grande quantità di fulmini, molto superiore rispetto alle altre zone montane dell'arco alpino (la fig. 2.9.3), evidenzia come le Prealpi Giulie siano una delle aree di massima densità dei fulmini nube-suolo in tutta Europa).

I fulmini sono diventati negli ultimi anni la principale causa dello scoppio degli incendi nella zona montana; incendi che il più delle volte scoppiano in zone di cresta o a mezzo versante su pendii molto acclivi e quasi inaccessibili. Gli incendi estivi provocati da fulmini sono un fenomeno conosciuto anche in passato ma negli ultimi anni, a seguito dei cambiamenti climatici, hanno cambiato radicalmente la loro struttura trasformandosi da incendi sotterranei o superficiali, ma di limitata estensione, a fenomeni talvolta devastanti in grado di generare fiamme alte decine di metri, di espandersi con propagazione di tipo "chioma attivo" e fenomeni di "spotting" di proporzioni sconosciute (foto 2.9.1). Preoccupante è la ripetitività con cui si sviluppano incendi provocati da fulmine soprattutto negli ultimi anni. A partire dal 1998 il fenomeno è diventato quasi una costante che accompagna le stagioni estive con annate come il 2003, 2006 e 2013 veramente disastrose.

fig. 2.9.3 - Distribuzione spaziale della densità dei fulmini nube-suolo (Feudale e Manzato, 2014)

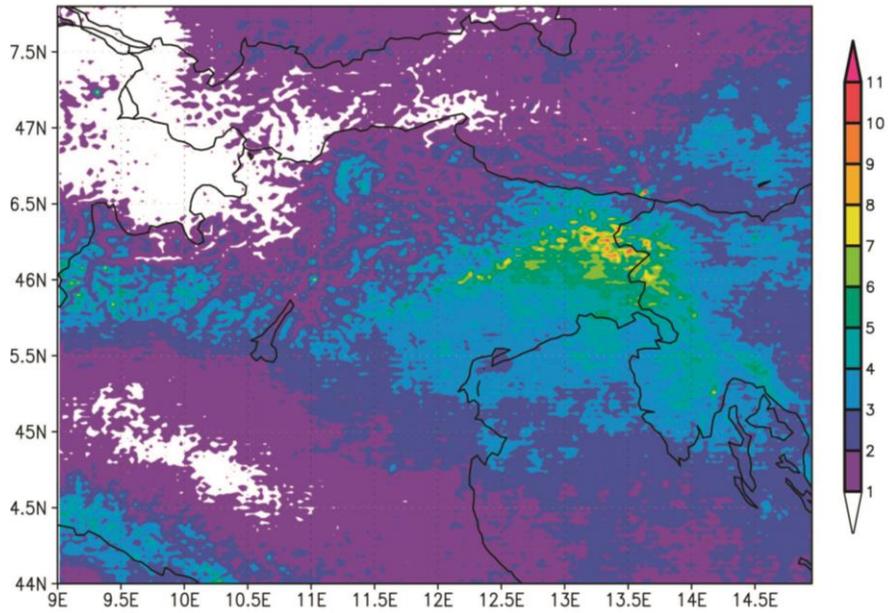



foto 2.9.1. Incendio monte Jovet (Chiusaforte) 04.08.2013 (fase di massima espansione).

Dopo la terribile estate del 2003, che ha provocato oltre 20 incendi da fulmine in un periodo molto concentrato e con l'episodio più grave che ha interessato una superficie di oltre 250 ettari, anche nel 2006 si sono registrati oltre venti incendi con tre eventi che hanno superato i trenta ettari per arrivare al 2013 con l'incendio del Monte Jovet che ha superato 945 ettari ed è durato 50 giorni.

Caratteristica di questo tipo di incendi è che se non vengono prontamente individuati e posti sotto controllo poi con le tecniche attuali diventano di fatto impossibili da spegnere. Dopo un periodo prolungato con assenza di precipitazioni significative, temperature massime che durante il giorno possono superare anche i 35 gradi, bassa umidità atmosferica rendono il combustibile vegetale facilmente infiammabile (foto 2.9.2).

Foto 2.9.2 Incendio Monte Uarchec (Resiutta 25 maggio 2011)

Va inoltre sottolineato che in queste situazioni quello che brucia all'interno dei boschi non è solo la parte vegetale ma anche l'intero suolo fino alla roccia madre con danni che non interessano quindi solo le piante ma l'intero ecosistema (foto 2.9.3).

Foto 2.9.3 Post incendio area bruciata di chioma attiva incendio Monte Jovet Chiusaforte 2013

Il Corpo forestale e la Protezione civile della regione in questi ultimi dieci anni hanno già fatto un notevole sforzo per formare personale specializzato in grado di operare in situazioni di ambiente impervio e acquisire attrezzature adatte a questo scopo, per cui si può presumere che nel breve periodo ben difficilmente si potranno migliorare ulteriormente le tecniche di spegnimento. Inoltre, visto il periodo di ristrettezze economiche generali, non è ipotizzabile che ci sia un aumento dei mezzi aerei dedicati allo spegnimento né a livello regionale né nazionale.

Risulta pertanto indispensabile che nel breve medio periodo la comunità scientifica regionale si interessi anche a questo aspetto e in sinergia con il personale del CFR si attivi per una migliore comprensione di questo fenomeno e per l'individuazione di una serie di elementi utili a comprendere i motivi dello scoppio e le modalità di propagazione di questo tipo di incendi.

Ulteriore bibliografia per approfondire l'argomento:

Battisti, A., 2008. Forests and climate change - lessons from insects. iForest - Biogeosciences For. 1, 1–5.

Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Bernhofer, C., Carrara, A., Chevallier, F., De Noblet, N., Friend, a D., Friedlingstein, P., Grünwald, T., Heinesch, B., Keronen, P., Knohl, A., Krinner, G., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Papale, D., Pilegaard, K., Rambal, S., Seufert, G., Soussana, J.F., Sanz, M.J., Schulze, E.D., Vesala, T., Valentini, R., 2005. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. Nature 437, 529–533. https://doi.org/10.1038/nature03972

Ciais, P., Schelhaas, M.J., Zaehle, S., Piao, S.L., Cescatti, A., Liski, J., Luyssaert, S., Le-Maire, G., Schulze, E.-D., Bouriaud, O., Freibauer, A., Valentini, R., Nabuurs, G.J., 2008. Carbon accumulation in European forests. Nat. Geosci. 16, 1555–1574. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1038/ngeo233

Dyderski, M.K., Paź, S., Frelich, L.E., Jagodziński, A.M., 2017. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? Glob. Chang. Biol. https://doi.org/10.1111/gcb.13925

Elkin, C., Gutiérrez, A.G., Leuzinger, S., Manusch, C., Temperli, C., Rasche, L., Bugmann, H., 2013. A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. Glob. Chang. Biol. 19, 1827–40. https://doi.org/10.1111/gcb.12156

Feudale, L., Manzato A. (2014) - Cloud–to–Ground Lightning Distribution and its Relationship with Orography and anthropogenic emissions in the Po Valley, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.53, 2651-2670.

Gasparini, P., Tabacchi, G., 2011. L'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio INFC 2005. Secondo inventario forestale nazionale italiano. Metodi e risultati. Ministero delle Politiche Agricole, Alimentari e Forestali; Corpo Forestale dello Stato. Consiglio per la Ricerca e la Sperimentazione in Agricoltura, Unità di ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Edagricole-Il Sole 24 ore, Bologna.

Grace, J., 2002. Impacts of Climate Change on the Tree Line. Ann. Bot. 90, 537–544. https://doi.org/10.1093/aob/mcf222

Handa, I.T., Körner, C., Hättenschwiler, S., 2006. Conifer stem growth at the altitudinal treeline in response to four years of CO2 enrichment. Glob. Chang. Biol. 12, 2417–2430. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01258.x

Hanewinkel, M., Cullmann, D. a., Schelhaas, M.-J., Nabuurs, G.-J., Zimmermann, N.E., 2012. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. Nat. Clim. Chang. 3, 203–207. https://doi.org/10.1038/nclimate1687

Harsch, M. a, Hulme, P.E., McGlone, M.S., Duncan, R.P., 2009. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. Ecol. Lett. 12, 1040–9. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01355.x

Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, a J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B.E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A.D., Roupsard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang, K., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature 467, 951–4. https://doi.org/10.1038/nature09396

Knorr, W., Dentener, F., Hantson, S., Jiang, L., Klimont, Z., Arneth, A., 2016. Air quality impacts of European wildfire emissions in a changing climate. Atmos. Chem. Phys. 16, 5685–5703. https://doi.org/10.5194/acp-16-5685-2016

Levers, C., Verkerk, P.J., Müller, D., Verburg, P.H., Butsic, V., Leitão, P.J., Lindner, M., Kuemmerle, T., 2014. Drivers of forest harvesting intensity patterns in Europe. For. Ecol. Manage. 315, 160–172. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.030

Liang, J., Crowther, T.W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E.-D., McGuire, A.D., Bozzato, F., Pretzsch, H., De-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C.B., Glick, H.B., Hengeveld, G.M., Nabuurs, G.-J., Pfautsch, S., Viana, H., Vibrans, A.C., Ammer, C., Schall, P., Verbyla, D., Tchebakova, N., Fischer, M., Watson, J.V., Chen, H.Y.H., Lei, X., Schelhaas, M.-J., Lu, H., Gianelle, D., Parfenova, E.I., Salas, C., Lee, E., Lee, B., Kim, H.S., Bruelheide, H., Coomes, D.A., Piotto, D., Sunderland, T., Schmid, B., Gourlet-Fleury, S., Sonké, B., Tavani, R., Zhu, J., Brandl, S., Vayreda, J., Kitahara, F., Searle, E.B., Neldner, V.J., Ngugi, M.R., Baraloto, C., Frizzera, L., Bałazy, R., Oleksyn, J., Zawiła-Niedźwiecki, T., Bouriaud, O., Bussotti, F., Finér, L., Jaroszewicz, B., Jucker, T., Valladares, F., Jagodzinski, A.M., Peri, P.L., Gonmadje, C., Marthy, W., O'Brien, T., Martin, E.H., Marshall, A.R., Rovero, F., Bitariho, R., Niklaus, P.A., Alvarez-Loayza, P., Chamuya, N., Valencia, R., Mortier, F., Wortel, V., Engone-Obiang, N.L., Ferreira, L.V., Odeke, D.E., Vasquez, R.M., Lewis, S.L., Reich, P.B., 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. Science (80-.). 354. https://doi.org/10.1126/science.aaf8957

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. For. Ecol. Manage. 259, 698–709. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023

Luyssaert, S., Ciais, P., Piao, S.L., Schulze, E.-D., Jung, M., Zaehle, S., Schelhaas, M.J., Reichstein, M., Churkina, G., Papale, D., Abril, G., Beer, C., Grace, J., Loustau, D., Matteucci, G., Magnani, F., Nabuurs, G.J., Verbeeck, H., Sulkava, M., van der WERF, G.R., Janssens, I. a., 2010. The European carbon balance. Part 3: forests. Glob. Chang. Biol. 16, 1429–1450. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02056.x

Makarieva, A.M., Gorshkov, V.G., Li, B.-L., 2009. Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. Ecol. Complex. 6, 302–307. https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2008.11.004

Menzel, A., Fabian, P., 1999. Growing season extended in Europe. Nature 397, 659.

Menzel, A., Sparks, T.H., Estrella, N., Koch, E., Aasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F.M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatczak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheifinger, H.,

Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A.J.H., Wielgolaski, F.-E., Zach, S., Zust, A., 2006. European phenological response to climate change matches the warming pattern. Glob. Chang. Biol. 12, 1969–1976. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01193.x

Mina, M., Bugmann, H., Cordonnier, T., Irauschek, F., Klopcic, M., Pardos, M., Cailleret, M., 2017. Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. J. Appl. Ecol. 54, 389–401. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12772

Mouillot, F., Rambal, S., Joffre, R., 2002. Simulating climate change impacts on fire frequency and vegetation dynamics in a Mediterranean-type ecosystem. Glob. Chang. Biol. 8, 423–437. https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00494.x

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. Environ. Sci. Policy 54, 438–447. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012

Reichstein, M., Ciais, P., Papale, D., Valentini, R., Running, S., Viovy, N., Cramer, W., Granier, a., Ogée, J., Allard, V., Aubinet, M., Bernhofer, C., Buchmann, N., Carrara, a., Grünwald, T., Heimann, M., Heinesch, B., Knohl, a., Kutsch, W., Loustau, D., Manca, G., Matteucci, G., Miglietta, F., Ourcival, J.M., Pilegaard, K., Pumpanen, J., Rambal, S., Schaphoff, S., Seufert, G., Soussana, J.-F., Sanz, M.-J., Vesala, T., Zhao, M., 2007. Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. Glob. Chang. Biol. 13, 634–651. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01224.x

Ruiz-Benito, P., Ratcliffe, S., Zavala, M.A., Martínez-Vilalta, J., Vilà-Cabrera, A., Lloret, F., Madrigal-González, J., Wirth, C., Greenwood, S., Kändler, G., Lehtonen, A., Kattge, J., Dahlgren, J., Jump, A.S., 2017. Climate- and successional-related changes in functional composition of European forests are strongly driven by tree mortality. Glob. Chang. Biol. 23, 4162–4176. https://doi.org/10.1111/gcb.13728

Seidl, R., Rammer, W., Lexer, M.J., 2010. Climate change vulnerability of sustainable forest management in the Eastern Alps. Clim. Change 106, 225–254. https://doi.org/10.1007/s10584-010-9899-1

Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano, G., Wild, J., Ascoli, D., Petr, M., Honkaniemi, J., Lexer, M.J., Trotsiuk, V., Mairota, P., Svoboda, M., Fabrika, M., Nagel, T.A., Reyer, C.P.O., 2017. Forest disturbances under climate change. Nat. Clim. Chang. 7, 395–402. https://doi.org/10.1038/nclimate3303

Vitali, V., Büntgen, U., Bauhus, J., 2017. Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. Glob. Chang. Biol. 5108–5119. https://doi.org/10.1111/gcb.13774

Zang, C., Pretzsch, H., Rothe, A., 2011. Size-dependent responses to summer drought in Scots pine, Norway spruce and common oak. Trees 26, 557–569. https://doi.org/10.1007/s00468-011-0617-z

Zhao, M., Running, S.W., 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science 329, 940–3. https://doi.org/10.1126/science.1192666

2.10 Agricoltura e produzione alimentare

L'interazione tra agricoltura, clima e variabilità climatica è indubitabile. Da un lato le condizioni medie di pioggia, temperatura, vento, ecc. di una certa zona determinano le **specie coltivabili** e la **potenzialità produttiva** di quel territorio. Dall'altro la variabilità climatica interannuale modula le produzioni sia in termini qualitativi che quantitativi: la frase "è stata una buona annata" riassume in maniera efficace questa interazione.

Le tecniche agricole, prima fra tutte l'irrigazione, entro certi limiti possono compensare questi vincoli climatici, ma a volte i costi economici che ne derivano risultano troppo elevati. È quindi evidente che un cambiamento delle condizioni medie climatiche e della loro variabilità avrà delle conseguenze dirette e indirette sul settore primario.

Gli impatti dei cambiamenti climatici su questo settore possono riguardare **modifiche all'agroecosistema**, **variazioni delle produzioni agrarie** o **l'allevamento di animali di interesse zootecnico**.

Nella tabella 2.10.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura e la produzione alimentare descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tabella 2.10.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura e la produzione alimentare, come descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)			IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Agroecosistema	Produzioni agrarie	Animale di interesse zootecnico			
	X		**Incremento produzioni in colture C3**	Con buona disponibilità idrica colture a ciclo non determinato possono incrementare la produttività in presenza di una maggiore nutrizione carbonica.	Aumento della concentrazione di CO_2
X			**Variazione del panorama colturale**	La maggiore disponibilità termica potrà consentire l'introduzione di specie e/o varietà tipiche di climi più caldi a scapito di altre.	Aumento delle temperature medie annue e stagionali
X			**Variazione della fitopatie e aumento della pressione parassitaria.**	Temperature medie maggiori favoriscono determinate fitopatia a scapito di altre (specie nelle crittogame) e favoriscono la diffusione degli insetti.	Aumento delle temperature medie annue e stagionali
	X		**Diminuzione produttiva delle principali colture agricole**	Aumento della respirazione e concomitante riduzione della stagione di crescita.	Aumento delle temperature medie annue e stagionali
	X		**Aumento dei danni da gelata**	Anticipo del risveglio vegetativo primaverile e conseguente maggiore sensibilità ai ritorni di freddo.	Aumento delle temperature medie stagionali
	X		**Aumento dei danni da agenti fisici**	Aumenta le perdite di produzione dovute a forti piogge, colpi di vento, calore eccessivo ecc..	Incremento ondate di calore, eventi meteorologici intensi
	X		**Riduzione acqua nel suolo**	Aumento delle richieste irrigue e/o diminuzione delle produzioni in caso di risorse idriche limitate.	Diminuzione delle piogge e della loro frequenza
X			**Variazione del panorama colturale**	La minore disponibilità idrica potrà determinare la sostituzione di alcune specie e/o varietà con altre maggiormente tolleranti allo stress idrico. Eventuale abbandono di alcuni terreni non più vocati.	Diminuzione delle piogge e della loro frequenza
X	X		**Riduzione delle sostanze umiche del suolo**	Diminuzione della produttività e aumento dei costi di produzione per il ripristino delle condizioni fisico/chimiche dei suoli.	Riduzione delle piogge medie e aumento temperatura media
X	X		**Aumento della salinizzazione del suolo**	L'innalzarsi del livello del mare, coadiuvato dai fenomeni di subsidenza dei terreni, e l'incrementarsi degli eventi di mareggiata potrebbero aumentare il cuneo salino nel suolo, con danni alle culture	Innalzamento del livello del mare, aumento delle mareggiate
		X	**Riduzione della produttività zootecnica**	Gli animali di interesse zootecnico saranno esposti ad effetti sia indiretti (es. crescita e qualità dei foraggi, disponibilità idrica, sopravvivenza di agenti patogeni e/o dei loro vettori), che diretti (es. un maggior rischio di stress da caldo durante il periodo estivo).	Aumento delle temperature medie estive, diminuzione delle piogge e aumento delle ondate di calore

Oggi circa un terzo del territorio regionale è destinato a usi agricoli ed agropastorali, ed è probabile che i cambiamenti climatici determineranno la modifica del **panorama colturale** e del **paesaggio** di queste aree (**agroecosistema**). Infatti l'aumento medio della temperatura, con la conseguente maggiore disponibilità termica, potrà consentire sia l'introduzione di specie e/o varietà tipiche di climi più caldi, che l'aumento delle superfici destinate a colture a ciclo autunno-primaverile in luogo di quelle estive. Oltre a ciò, la diminuzione delle piogge (specie di quelle estive), e la conseguente minore disponibilità idrica nei terreni, potrebbe determinare la sostituzione di alcune specie con altre maggiormente tolleranti allo stress idrico, e nuovamente l'aumento delle superfici destinate a colture a ciclo autunno-

primaverile al posto di quelle estive. Potrebbe inoltre verificarsi, a causa della scarsa capacità di ritenzione idrica e della maggiore necessità di ricorrere alla pratica irrigua, l'abbandono di alcuni terreni non più adatti alla coltivazione.

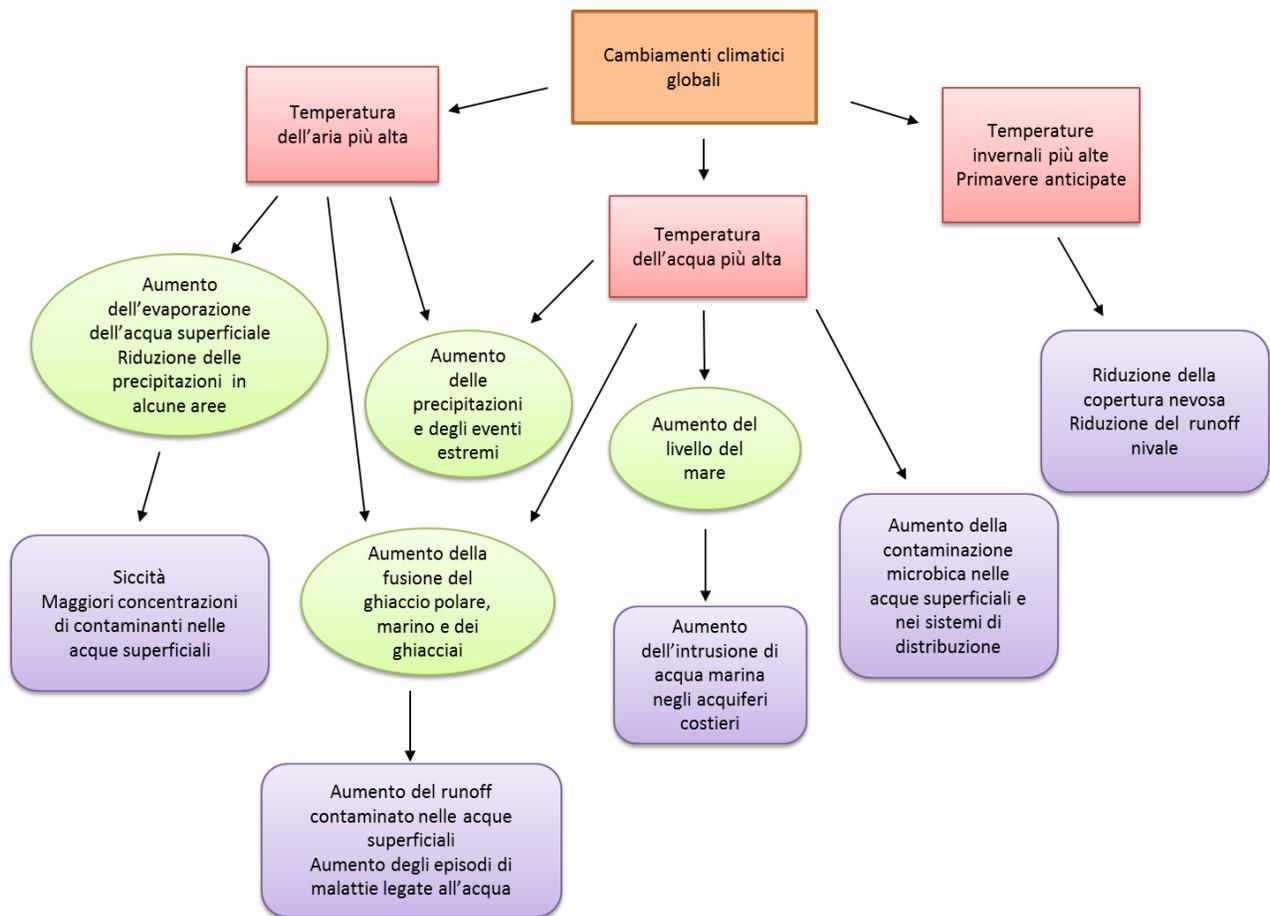
Si potrebbe assistere anche ad una **diminuzione della produttività** agricola e all'aumento dei costi di produzione per la necessità di ripristinare delle condizioni fisico/chimiche del terreno (specialmente il contenuto di humus). Questi eventi potrebbero avere un'incidenza territoriale generalizzata, ma particolarmente rilevante nella bassa pianura friulana, in special modo lungo la fascia costiera che potrà essere soggetta anche ad un graduale processo di salinizzazione per l'aumento del livello del mare e per eventuali fenomeni di subsidenza del terreno. Oltre alla maggiore richiesta di irrigazione e di apporto di sostanza organica dei terreni, potrebbe essere necessario anche un adeguamento delle strategie di difesa alle crittogame e una intensificazione delle pratiche per il contenimento degli insetti.

In presenza di una buona disponibilità idrica, l'innalzamento della concentrazione atmosferica di CO_2 potrebbe determinare un lieve incremento della produzione delle colture a ciclo non determinato (specie nelle C_3). L'aumento della respirazione e la concomitante riduzione della stagione di crescita, dovuta alle temperature medie più elevate, potrebbe però portare ad una riduzione delle rese, specialmente per le piante a ciclo determinato, e inoltre la maggiore variabilità climatica potrebbe aumentare, per le colture, l'incidenza e gravità dei danni di origine meteorologica come gelate, piogge forti e colpi di vento.

foto 2.10.1 Danni da gelata tardiva alle viti (Mariano del Friuli, aprile 2014)

I cambiamenti climatici potranno avere ripercussioni negative anche sul **settore dell'allevamento**: gli animali di interesse zootecnico potrebbero essere esposti ad effetti sia indiretti (per esempio la riduzione della crescita e qualità dei foraggi e della disponibilità idrica, e per la maggior sopravvivenza degli agenti patogeni e/o dei loro vettori), che diretti (un maggior rischio di stress da caldo durante il periodo estivo), che potrebbero portare ad un aumento della mortalità, una crescita dei costi e un calo delle rese.

Come evidenziato dalla SNACC, l'agricoltura presenta con moltissimi settori stretti collegamenti caratterizzati da un rapporto di reciproca influenza. Tra questi vi sono la disponibilità di risorse idriche (qualità e quantità), il degrado dei suoli agricoli (erosione, salinizzazione ed inquinamento), il dissesto idrogeologico, la riduzione di biodiversità (vegetale ed animale), la salute (patologie animali e vegetali), la richiesta energetica ed i centri urbani

fig. 2.10.1 - Modalità attraverso cui il cambiamento climatico può impattare sul settore della salute e dell'agricoltura tramite le modifiche ai regimi delle piogge, dell'equilibrio acqua/ghiaccio/vapore, del livello del mare, della qualità delle acque e del runoff nevale primaverile. (Swiss-Re, 2005)

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 40
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 441-454
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 163-188

Altre fonti consultate:

- Swiss-Re (2005) - Climate Change Futures. Health, Ecological and Economic Dimensions

Vedi anche il caso studio:

3.8 *Colture economicamente rilevanti*

FOCUS Effetti dei cambiamenti climatici sulla vite

Paolo Sivilotti - Università degli Studi di Udine, Dipartimento di Scienze agroalimentari, ambientali e animali

Il riscaldamento globale ha un impatto importante sulla produttività e sulla qualità delle uve. La vite infatti germogliando prima, da un lato è più sensibile ai ritorni di freddo, dall'altro raggiunge la maturazione più velocemente, poiché il fabbisogno termico viene soddisfatto in un minor tempo. Negli ultimi anni, inoltre, si sono intensificati i problemi legati allo stress idrico e alle scottature che, oltre a ridurre la produzione, producono nei vini sentori di qualità atipici oltreché un aumento della gradazione alcolica.

Foto 2.10.2 – effetti di stress idrico molto severo in vigneti di Terrano nell'anno 2012.

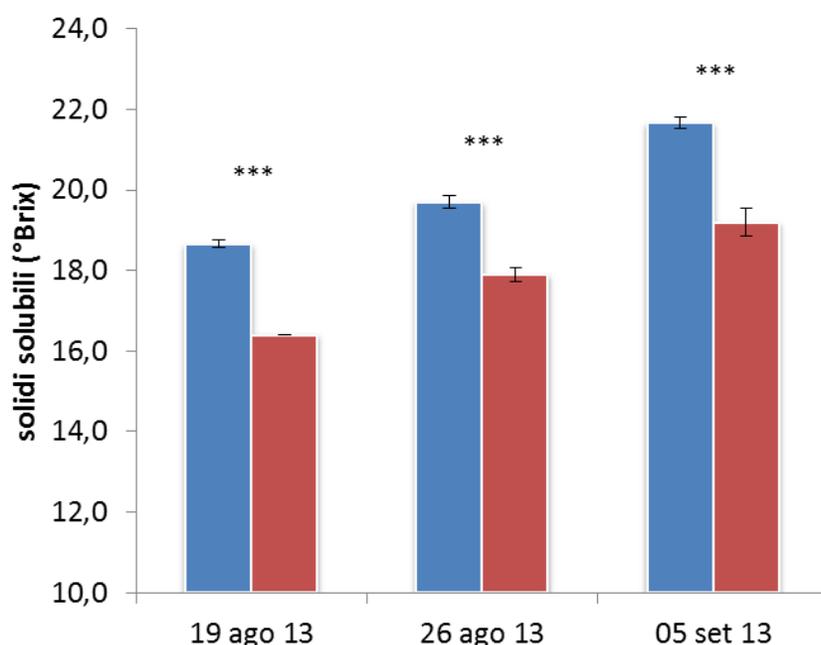
Evidenze attuali

Negli ultimi anni anche in Friuli Venezia Giulia l'aumento delle temperature, delle ondate di calore e di periodi lunghi di stress idrico, hanno comportato riduzioni delle produzioni e maturazioni delle uve più spinte; questo ha portato alla produzione di vini con livelli alcolici elevati e una qualità organolettica non sempre equilibrata, condizione aggravata dalle scottature che sempre più si osservano nei vigneti.

Dal punto di vista della tecnica viticola, è necessario mettere in campo diverse azioni per mitigare l'effetto del cambiamento climatico come di seguito esemplificato:

- danni da gelo attraverso tecniche che ritardino il germogliamento;
- stress idrico (Figura 1) utilizzando piani di irrigazione dei vigneti che tengano in considerazione un bilancio idrico calibrato sulle diverse situazioni pedologiche;

- accumulo eccessivo di zuccheri nelle uve che è possibile affrontare con la gestione della chioma, la cimatura o la defogliazione apicale che vengono applicate per rallentare la maturazione delle uve e l'applicazione di antitraspiranti. In questo particolare ambito, studi recenti condotti in regione hanno verificato come la cimatura tardiva porti ad una riduzione dell'accumulo di zuccheri nelle bacche e quindi possa essere utilizzata al fine di mitigare l'effetto delle crescenti temperature (Figura 1).

fig. 2.10.2 - effetto della cimatura apicale tardiva sull'accumulo di solidi solubili in uve Chardonnay coltivate nella zona D.O.C. Collio nell'anno 2013 Le medie per data sono state analizzate con il test t di Student (ns, non significativo; *, $p<0.05$; ***, $p<0.001$).

- scottature che possono essere mitigate attraverso l'utilizzo di argille (caolino) che schermano l'effetto delle radiazioni solari; e con una attenzione alla tempistica di defogliazione.

Nel prossimo futuro molto probabilmente sarà necessario ripensare alle forme di allevamento, alla selezione di varietà più adatte alle maggiori temperature che i climatologi prevedono per la fine del millennio.

Bibliografia

Bobeica, N., Poni, S., Hilbert, G., Renaud, C., Gomès, E., Delrot, S. and Dai, Z., (2015) Differential responses of sugar, organic acids and anthocyanins to source-sink modulation in Cabernet Sauvignon and Sangiovese grapevines. Front. Plant Sci. **6**, 382.

Duchêne, E. and Schneider, C., (2005) Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. Agron. Sustain. Dev. **25**, 93-99.

Filippetti, I., Movahed, N., Allegro, G., Valentini, G., Pastore, C., Colucci, E. and Intrieri, C., (2015) Effect of post-veraison source limitation on the accumulation of sugar, anthocyanins and seed tannins in Vitis vinifera cv. Sangiovese berries. Aust. J. Grape Wine Res. **21**, 90–100.

Herrera, J.C., Bucchetti, B., Sabbatini, P., Comuzzo, P., Zulini, L., Vecchione, A., Peterlunger, E. and Castellarin, S.D., (2015) Effect of water deficit and severe shoot trimming on the composition of Vitis vinifera L. Merlot grapes and wines. Aust. J. Grape Wine Res. **21**, 254–265.

Jones, G., (2005) Climate change and global wine quality. Climatic Change **73**, 319-343.

Palliotti, A., Panara, F., Silvestroni, O., Lanari, V., Sabbatini, P., Howell, G.S., Gatti, M. and Poni, S., (2013) Influence of mechanical postveraison leaf removal apical to the cluster zone on delay of fruit ripening in Sangiovese (*Vitis vinifera* L.) grapevines. Aust. J. Grape Wine Res. **19**, 369–377.

Poni, S., Gatti, M., Bernizzoni, F., Civardi, S., Bobeica, N., Magnanini, E. and Palliotti, A., (2013) Late leaf removal aimed at delaying ripening in cv. Sangiovese : physiological assessment and vine performance. Aust. J. Grape Wine Res. **19**, 378–387.

Webb, L.B., Whetton, P.H. and Barlow, E.W.R., (2007) Modelled impact of future climate change on the phenology of winegrapes in Australia. Aust. J. Grape Wine Res. **13**, 165-175.

Webb, L.B., Whetton, P.H. and Barlow, E.W.R., (2008) Climate change and winegrape quality in Australia. Climate Res. **36**, 99-111.

2.11 Pesca marittima

figura 2.11.1 - Salpamento di una rete tramaglio nel Golfo di Trieste

La pesca nazionale contribuisce solo per una modesta parte alla richiesta interna di prodotti ittici ma ha una notevole importanza in termini storici, culturali e di gestione dell'ambiente marino, cui si aggiunge un'elevata importanza socio-economica. Dato questo ruolo tradizionale, è importante studiare gli impatti legati ai cambiamenti climatici e le vulnerabilità da essi indotte in questo settore produttivo, come evidenziato dalla Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNACC).

Nella tabella 2.11.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sulla pesca marittima descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tab. 2.11.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sulla pesca, descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)		IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Diminuzione locale delle specie ad affinità fredda	Cambiamento areale di distribuzione delle specie target di pesca			
X	X	**Modificazione delle comunità ittiche**	Presenza di nuove specie di interesse commerciale, diminuzione e/o sparizione di specie alieutiche indigene, con conseguente riduzione delle risorse ittiche sfruttabili dal settore ittico	Aumento della temperatura delle acque, variazione del regime delle correnti

In ambito regionale i macro impatti previsti sono relativi alla **diminuzione locale delle specie ad affinità fredda** e al **cambiamento dell'areale di distribuzione delle specie bersaglio di pesca.**

Nei mari italiani e nell'intero Mediterraneo gran parte delle popolazioni ittiche di interesse commerciale sono sovrasfruttate, e in molti casi è difficile distinguere gli effetti dovuti alla pesca eccessiva da quelli prodotti dai cambiamenti climatici. È quindi di fondamentale importanza ridurre il tasso di sfruttamento al fine di rendere le popolazioni ittiche pescate più resilienti alle future modifiche del loro ambiente.

I cambiamenti climatici potranno inoltre avere effetti sulla **composizione delle comunità ittiche**, poiché le specie termofile non indigene di origine subtropicale tenderanno a stabilirsi nei mari italiani mentre alcune specie autoctone che necessitano di temperature dell'acqua inferiori diventeranno sempre meno abbondanti.

I possibili impatti dei nuovi scenari climatici a livello regionale saranno assai diversificati, con ripercussioni sia sulla produttività delle risorse, che sulle operazioni di pesca. I pescatori dovranno pertanto adattare sempre di più alle nuove condizioni le loro tattiche di pesca, che dovranno necessariamente differire, almeno in parte, da quelle del passato e basarsi perciò sempre meno sulle conoscenze, tramandate o apprese per esperienza, sulle consuetudini e sulla stagionalità della pesca.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 43
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 480-497
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 192-199

Vedi anche il Focus:: Cambiamenti climatici e ambiente marino-costiero nel capitolo 2.6 Ecosistemi marini.

2.12 Acquacoltura

L'acquacoltura ha strette relazioni con gli ambienti e gli ecosistemi di acque interne, di transizione e marine ed è considerata anche nella Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (SNACC) tra i settori socio-economici più vulnerabili ai cambiamenti climatici. Le attività d'allevamento di pesci e molluschi sono molto radicate nel territorio del Friuli Venezia Giulia e rappresentano un'importante fonte di occupazione e di reddito per le comunità costiere e rurali. Nella tabella 2.12.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sull'acquacoltura descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tab. 2.12.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sull'acquacoltura, descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)		IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Diminuzione produttività impianti acquacoltura	Rischio sulla salubrità del prodotto allevato			
X		**Cambiamenti fenologici**	Riduzione del reclutamento naturale delle specie alieutiche marino-lagunari.	Aumento della temperatura delle acque superficiali
X		**Riduzione del reclutamento naturale di molluschi e giovanili di specie ittiche**	Problemi di calcificazione dei bivalvi e alterazioni nello sviluppo morfologico nei pesci.	Aumento della CO_2 atmosferica
X		**Riduzione della concentrazione di ossigeno**	Riduzione della crescita e della sopravvivenza, aumento della suscettibilità alle malattie, sviluppo di organismi dannosi/tossici	Aumento della temperatura delle acque superficiali
X		**Superamento del range di tolleranza termica**	Riduzione della crescita e impatto sulla salute e sulla sopravvivenza delle specie allevate e delle popolazioni naturali.	Aumento della temperatura delle acque superficiali
	X	**Eutrofizzazione e fioriture di alghe tossiche**	Aumento dei rischi sanitari nel consumo di molluschi bivalvi.	Aumento della temperatura delle acque superficiali
	X	**Incidenza e diffusione di malattie**	Maggiore incidenza di patologie e comparsa di nuove malattie; estensione dei range di diffusione di parassiti e patogeni; mortalità massive.	Aumento della temperatura delle acque superficiali
X		**Mareggiate**	Per gli allevamenti in gabbie e mitilicolture in sospensione, l'impatto sarà determinato dall'aumento della frequenza degli eventi meteo marini estremi che possono causare danni strutturali agli allevamenti, con conseguente rischio di fughe degli animali allevati nel caso della pescicoltura marina.	Eventi meteo climatici estremi

In ambito regionale i macro impatti previsti sono relativi alla **diminuzione della produttività** degli impianti di acquacoltura ed al **rischio sulla salubrità** del prodotto allevato.

Le cause climatiche principali legate a questi impatti sono l'aumento della temperatura delle acque superficiali, l'aumento della CO_2 atmosferica, nonché la maggiore frequenza di eventi meteo climatici estremi. Di conseguenza si assisterà ad una **riduzione del reclutamento naturale** del novellame di molluschi e pesci, riduzione della concentrazione di ossigeno disciolto e superamento degli optimum di temperatura con problemi di sopravvivenza per le specie in coltura. L'intensificarsi delle mareggiate accoppiate anche all'innalzamento del livello medio del mare causeranno maggiori danni strutturali agli allevamenti costieri. La presenza e la proliferazione di **microalghe tossiche**, come pure la maggiore incidenza di patogeni e parassiti, aumenteranno nel primo caso i rischi sanitari al consumo di molluschi bivalvi, nel secondo la maggiore incidenza di patologie e la comparsa di nuove malattie a carco delle specie allevate.

Attualmente non vi sono misure in essere per contrastare gli impatti dei cambiamenti climatici sull'acquacoltura e l'ampliamento delle conoscenze in questo campo risulterà di assoluta priorità.

foto 2.12.1 - Raccolta del prodotto in una valle da pesca lagunare

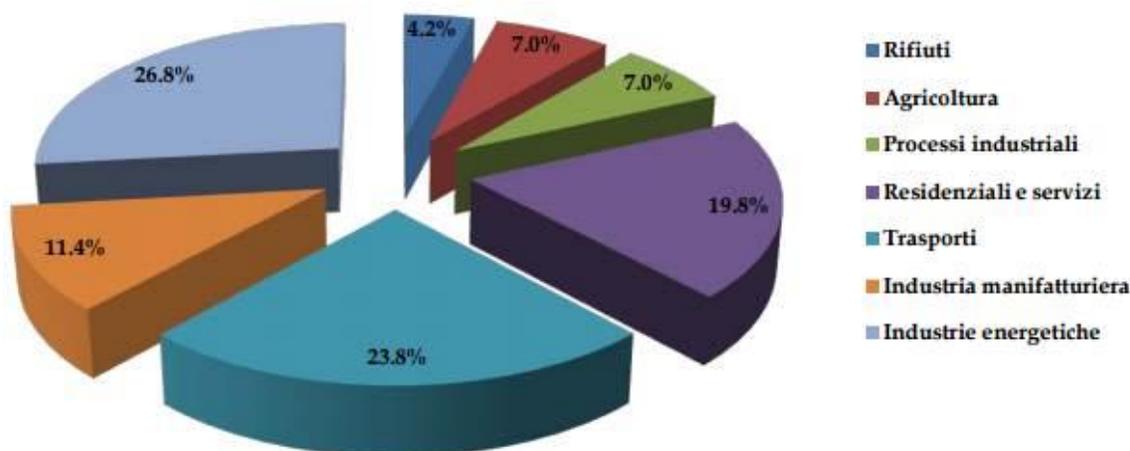
Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 43-45
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 507-523
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali* (versione di Luglio 2017) – pag. 203-213

Vedi anche il focus: *Cambiamenti climatici e ambiente marino*-costiero nel capitolo 2.6 Ecosistemi marini

2.13 Energia

Il settore energetico rappresenta un esempio di settore economico particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici per l'effetto, da un lato, dell'elevata sensitività della produzione e del consumo di energia rispetto all'andamento delle temperature e ai fenomeni estremi e, dall'altro, della severità dei requisiti ai quali devono rispondere i servizi energetici, in termini quantitativi e qualitativi, in particolare per quanto riguarda la loro continuità. Le attività di produzione e consumo dell'energia sono inoltre quelle maggiormente responsabili dell'emissione di gas-serra nell'atmosfera. In Italia, nell'anno 2013, le attività relative alla produzione e al consumo dell'energia (industria manifatturiera, industrie energetiche e consumi per residenziali e servizi), senza tener conto dei trasporti, sono state responsabili di quasi il 60% delle emissioni nazionali di gas serra.

Figura 2.13.1 Ripartizione percentuale delle emissioni di gas climalteranti nel 2013 [Fonte: ISPRA]

Secondo le analisi del *Piano Energetico Regionale* (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015), la **domanda di energia elettrica regionale** (9.850,3 GWh) rappresenta il 3,1% del totale nazionale (318.475,1). Tuttavia, riferendo i consumi elettrici alla popolazione residente, il Friuli Venezia Giulia è stato caratterizzato nel 2013 da un consumo specifico pari 7.827 kWh/abitante, valore superiore del 58% a quello medio nazionale (4967 kWh/abitante). Tali dati indicano la marcata caratterizzazione *energy intensive* della Regione, imputabile in larga misura al settore industriale.

Sul fronte della **produzione di energia**, il Friuli Venezia Giulia concorre per circa il 3,3% alla formazione dell'offerta nazionale con 9.449,3 GWh prodotti nel 2013. Accanto alle centrali termoelettriche tradizionali, una importante realtà regionale è costituita dagli impianti idroelettrici che nell'anno 2013 hanno prodotto 1.791,7 GWh.

Diga di Ponte Antoi (Barcis, PN)

Analizzando **la domanda di energia elettrica** (fig. 2.13.2) emerge come il settore economico più energivoro sia il comparto industriale. Nel 2011, come da grafico che segue, l'industria ha rappresentato infatti il 58% dei consumi di energia elettrica in Regione (di cui il 34% imputabile al settore siderurgico, il 14% all'industria cartaria, il 12% il settore meccanico e il 11% al comparto del legno e del mobilio).

Il terziario costituisce il secondo settore in termini di consumi di elettricità (25% della richiesta totale di cui il 21% rappresentato dal commercio, il 18% dai trasporti, il 10% dal settore alberghiero e della ristorazione e il 9% dalla pubblica amministrazione). Seguono il settore domestico, responsabile del 15% del fabbisogno di energia elettrica, e il settore primario e i consumi ferroviari per trazione (entrambi 1%).

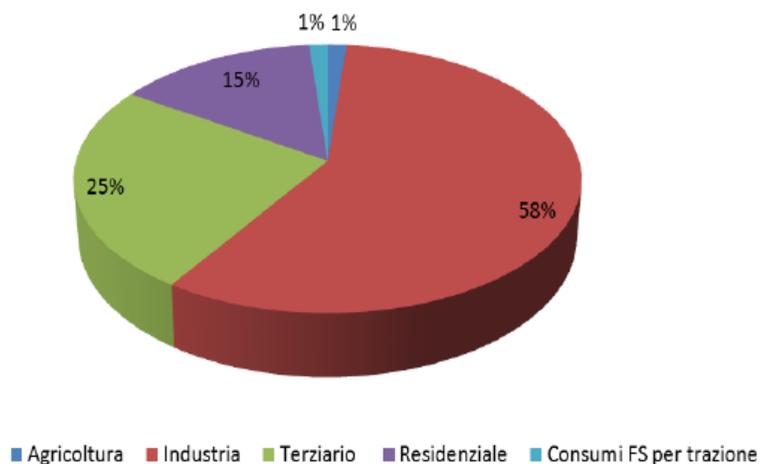
fig. 2.13.2 - Ripartizione percentuale dei consumi di energia elettrica per categoria economica (Regione Autonoma FVG, 2015 - Rielaborazione Dati Terna, Dati statistici 2013)

Nella tabella 2.13.1 sono riepilogati i principali macro-impatti dei cambiamenti climatici sul settore dell'energia descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tabella 2.13.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sull'energia descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)			IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Modifica dei consumi energetici	Variabilità della produzione energetica	Variabilità della fornitura energetica			
X			**Riduzione della spesa e del consumo energetico invernale**	Minor necessità di riscaldare gli edifici e i macchinari a causa dell'aumento delle temperature invernali.	Aumento delle temperature medie invernali
X			**Aumento della spesa e del consumo energetico in estate**	Aumento della necessità di raffreddare gli edifici e i macchinari a causa delle più alte temperature estive.	Aumento delle temperature medie estive
		X	**Maggiori probabilità di black-out**	Incrementi improvvisi della domanda energetica, con conseguente maggiore probabilità di black-out, dovuti alla elevata climatizzazione di abitazioni e luoghi di lavoro durante i picchi di calore;	Aumento delle ondate di calore
	X	X	**Decremento della potenzialità idroelettrica**	I periodi siccitosi più lunghi porteranno ad una riduzione della portata dei fiumi e della disponibilità idrica, con conseguenze impatto negativo sulla produttività ed efficienza degli impianti di produzione di energia idroelettrica.	Variazione della piovosità, aumento delle temperature medie estive
		X	**Variabilità della trasmissione e della distribuzione energetica**	Temperature elevate riducono la flessione delle linee elettriche e l'efficienza dei compressori dei gasdotti, aumentano la resistenza dei cavi, e quindi le perdite di trasmissione, e rende più difficile la dissipazione del calore prodotto.	Aumento delle temperature medie estive
	X	X	**Aumento della resa degli impianti fotovoltaici**	Aumento della produttività degli impianti fotovoltaici a causa dell'aumento della radiazione solare.	Aumento dell'energia radiante solare
		X	**Aumento dei danni da eventi estremi**	Aumentano le interruzioni dei servizi e gli interventi di manutenzione e riparazione a seguito di eventi meteorologici estremi.	Aumento della frequenza degli eventi estremi
	X	X	**Calo della produttività degli impianti termoelettrici**	Impossibilità di raffreddare adeguatamente gli impianti a causa del calo dei corsi d'acqua a seguito di periodi prolungati di siccità e dell'eccessivo riscaldamento dell'acqua di mare, e conseguente calo della produzione elettrica.	Variazione della piovosità, aumento delle temperature medie estive

Secondo la SNACC, l'innalzamento delle temperature avrà l'effetto di **incrementare molto i consumi elettrici nella stagione estiva,** per la crescente necessità di utilizzo dei sistemi di raffrescamento, e ciò porterà a probabili rischi di blackout dovuti al carico di punta. **Per il periodo invernale, si prevede invece che i consumi elettrici possano ridursi** a causa dell'utilizzo meno intensivo dei sistemi di riscaldamento (vedi caso studio 3.11 *Variazione dei consumi di metano per riscaldamento domestico in funzione dei cambiamenti climatici)*

La **capacità produttiva degli impianti termoelettrici** potrebbe risentire dell'aumento di frequenza e intensità degli eventi meteorologici violenti, come alluvioni e trombe d'aria, degli eventi estremi di temperatura e della riduzione nella disponibilità di acqua di raffreddamento. In corrispondenza di prolungati periodi di siccità infatti, il livello delle acque dei corpi idrici potrebbe risultare inadeguato per raffreddare i macchinari e gli impianti delle centrali a combustibili fossili raffreddate ad acqua, imponendo di conseguenza la riduzione o il blocco delle attività produttive per fenomeni di surriscaldamento, oltre che per la produzione idroelettrica.

Nel caso in cui il raffreddamento sia garantito da acque marine, l'innalzamento della loro temperatura potrebbe portare alla riduzione della produzione elettrica. Ad esempio, per la più grande centrale termoelettrica della regione FVG (Centrale Termoelettrica a2a di Monfalcone), per la condensazione del vapore di scarico turbina e per il raffreddamento dei vari macchinari viene prelevata acqua di mare dal canale Valentinis, nella misura massima di 36 m3/s. La portata d'acqua prelevata ha valori diversi in relazione ai periodi stagionali e alla potenza elettrica generata. L'acqua di mare prelevata dal canale Valentinis per il raffreddamento viene scaricata, senza ulteriori processi, nel canale Lisert, mantenendo inalterate le caratteristiche chimiche al prelievo. L'unica variazione è rappresentata da un aumento di temperatura di circa 8°C, comunque nel limite massimo di 35°C. Al raggiungimento della soglia indicata è prevista una procedura operativa interna che impone la riduzione del carico al personale addetto alla conduzione degli impianti.

Per valutare la rilevanza dei diversi impatti su questo settore così complesso saranno certamente opportuni approfondimenti futuri con i referenti istituzionali e gli operatori del settore.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC,* Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 45-46
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia,* Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 736-754
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali,* Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 307-319

Altre fonti consultate:

- Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (2015), *Piano Energetico Regionale* - http://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/ambiente-territorio/energia/FOGLIA111/allegati/PIANO_ENERGETICO_REGIONALE_ALLEGATO1.pdf

Vedi anche caso studio:

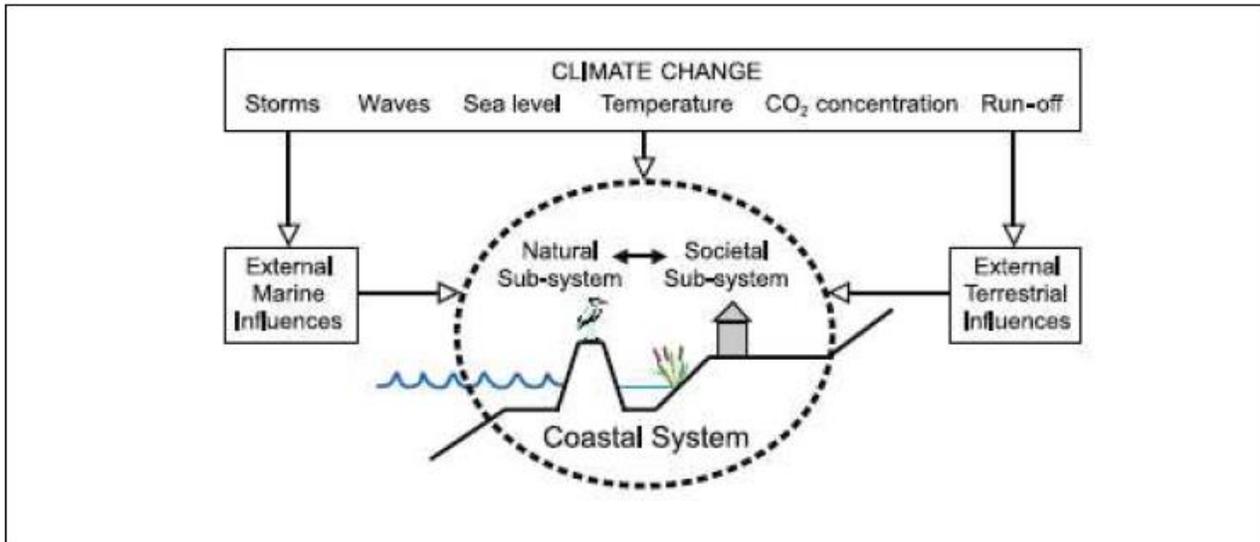
3.11 *Energia: effetti del riscaldamento globale sui consumi energetici per il riscaldamento di civili abitazioni*

2.14 Zone costiere

I documenti nazionali utilizzano la definizione di "**zona costiera**" del "Mediterranean Protocol on Integrated Coastal Zone Management" (2008), che la definisce come "regione geomorfologica, a cavallo della linea di riva, nella quale le interazioni fra gli elementi terrestri e marini avvengono internamente a sistemi ecologici complessi, formati da elementi biotici e abiotici, e in continua coesistenza e interazione con la comunità umana e le sue attività socio economiche".

La zona costiera, e i servizi ecosistemici a essa associati, si configurano come il punto di incontro e di forte interconnessione non solo della "terra con il mare", ma anche di dinamiche naturali e dinamiche antropiche, su cui i cambiamenti climatici agiscono sinergicamente e simultaneamente attraverso influenze esterne sia "marine" che "terrestri".

La *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNACC) dedica un capitolo specifico alle zone costiere, sebbene gli impatti dei cambiamenti climatici ivi descritti siano per la maggior parte ricompresi nella trattazione degli impatti su diversi settori, quali ecosistemi marini e delle acque di transizione, pesca, acquacoltura, turismo ecc.. Anche nella presente ricognizione si è scelto di mantenere questa impostazione, che consente di offrire una visione d'insieme dei diversi tipi di impatti che le zone costiere subiscono e potranno subire con i mutamenti delle condizioni climatiche già rilevati e attesi in futuro.

figura 2.14.1 – Sistemi costieri e variazioni climatiche. Azione attraverso influenze esterne di origine marina e terrestre (Nicholls et al., 2007)

Le zone costiere costituiscono sicuramente una "zona" dove la componente naturale è molto produttiva e di conseguenza molto produttrice di "beni" e fornitrice di "servizi" ecosistemici; non a caso le zone costiere sono le zone maggiormente abitate del pianeta: all'incirca la metà della popolazione del pianeta vive entro i 200 km di distanza dal mare.

I **servizi ecosistemici** nella zona costiera sono particolarmente sensibili agli impatti climatici, con effetti che possono propagarsi "a cascata" da un servizio all'altro; oltre a costituire un problema strettamente ecologico, i cambiamenti climatici potrebbero avere quindi impatti anche di natura socioeconomica. Gli ecosistemi costieri forniscono "**beni**" sotto forma di cibo, materie prime e prodotti farmaceutici, i quali sono essenziali e indispensabili allo sviluppo e alla articolazione degli insediamenti costieri. Forniscono inoltre anche "**servizi**" assolutamente indispensabili per gli esseri umani e ai loro sistemi socio-economici, come la depurazione di acqua e aria, la mitigazione di inondazioni e siccità, la detossicazione e decomposizione di rifiuti, la moderazione delle escursioni termiche, oltre alla capacità ricreativa, estetica e intellettuale. L'oceano è una componente essenziale del sistema climatico globale per le sue funzioni di regolazione che si esercitano attraverso l'assorbimento/rilascio e la redistribuzione del calore e dei gas atmosferici.

Gli impatti dei cambiamenti climatici possono dunque riguardare i **processi naturali** specifici delle zone costiere, i **servizi ecosistemici** forniti dalla zona costiera agli esseri umani ed ai sistemi socio-economici, così come la **vulnerabilità** delle aree costiere, in particolare delle zone urbanizzate.

Riassumendo, i principali impatti dei cambiamenti climatici sulle zone costiere potrebbero essere:

- possibili **variazioni nella distribuzione delle popolazioni ittiche** dovute a variazioni anche minime di temperatura o di ossigeno, e a cambiamenti nei pattern di distribuzione e migrazione per variazioni nel sistema

di circolazione generale dell'oceano, con impatto (positivo o negativo) sulle comunità e sui sistemi socio economici basati sul loro sfruttamento

- **scomparsa di specie commercialmente importanti** e conseguente danno economico
- **variazioni qualitative e quantitative nella struttura delle popolazioni** ittiche commercialmente importanti, causate dalle ingressioni in acque temperate di specie maggiormente adattate ad alte temperature
- le principali conseguenze di un mare costiero maggiormente "acido" riguarderanno principalmente e ovviamente tutti quegli organismi marini caratterizzati da strutture di supporto a difesa costituite da elementi calcarei: tutte quelle attività basate sulla **raccolta di organismi calcarei** (molluschi) sono particolarmente a rischio di impatto economico (e di conseguenza sociale).
- Le alterazioni dei cicli biogeochimici del mare costiero, indotte da alterazioni fisico-chimiche della struttura e della dinamica dell'ecosistema marino, altererebbero la pescosità delle zone costiere, ma anche il servizio di trattamento e depurazione dei reflui fognari, che si rifletterebbero in cascata sui servizi di "fornitura", modificando le risorse disponibili per le attività alieutiche e di acquacoltura ad anche sui servizi di regolazione dell'ambiente marino.
- aumento del livello del mare e **conflitti d'interesse** con la creazione di strutture di difesa costiera.
- profondi effetti sui servizi di supporto (ecosistemi marini) e fornitura per la variazione della temperatura sia atmosferica che marina.
- variazioni della struttura chimico, fisica ed ecologica dell'ecosistema marino costiero (temperatura, stratificazione, scarico fluviale) possono **modificare o esaurire la funzione depuratrice** delle acque costiere.
- aumento del livello del mare e variazioni nelle condizioni estreme dello stato del mare possono **aumentare i rischi di erosione e inondazione.**
- **perdita di valore estetico** dovuto ad alterazioni dell'equilibrio ambientale o a misure di adattamento/contenimento, danneggiando l'economia legata al servizio turistico ricreativo.
- l'alterazione delle caratteristiche climatiche delle zone costiere può profondamente modificare alcuni **servizi culturali (**ricreativi e turistici) e determinare (insieme alla perdita del valore estetico) importanti danni di tipo economico, essendo il turismo e un'importante voce dell'economia nazionale.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 46-47
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 529-569
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 73-81

Nel presente studio, gli impatti dei cambiamenti climatici sulle aree costiere sono descritti in relazione ai diversi sistemi naturali e settori socio-economici interessati nei seguenti capitoli:

- 2.4 DISSESTO IDROGEOLOGICO
- 2.6 ECOSISTEMI MARINI
- 2.7 ECOSISTEMI DI ACQUE INTERNE E DI TRANSIZIONE

- 2.8 SALUTE
- 2.11 PESCA MARITTIMA
- 2.12 ACQUACOLTURA
- 2.15 TURISMO

I cambiamenti del mare (livello, eventi estremi, temperatura, salinità ecc.) attuali e futuri, sono trattati nei capitoli:

- 1.1 VARIABILITÀ CLIMATICA PASSATA E PRESENTE - Mare
- 1.2 VARIABILITÀ CLIMATICA FUTURA - Mare

e nel caso studio

- 3.2 DISSESTO IDROGEOLOGICO: LA FREQUENZA DEGLI EVENTI DI ACQUA ALTA

2.15 Turismo

Il turismo è un settore particolarmente sensibile ai mutamenti ambientali innescati dai cambiamenti climatici, infatti comprende soprattutto attività che si svolgono all'aria aperta e che necessitano di determinate condizioni meteorologiche, ad esempio tempo bello e temperature gradevoli per il turismo balneare, precipitazioni nevose e basse temperature per quello montano invernale.

Secondo i principali documenti nazionali sull'adattamento ai cambiamenti climatici (SNACC e PNACC), le tipologie di turismo maggiormente colpite saranno il **turismo balneare**, con una riduzione degli spazi a causa dell'innalzamento del livello del mare e con una diminuzione dell'attrattività a causa dell'aumento delle temperature estive e delle ondate di calore, e il **turismo invernale montano**, che potrà subire un impatto rilevante in seguito al calo delle precipitazioni nevose, se diventeranno insufficienti a garantire un innevamento adeguato per le piste da sci o se le temperature non consentiranno di produrre neve artificiale.

Per molti turisti, le condizioni atmosferiche della destinazione costituiscono la motivazione fondante del viaggio, altri invece programmano le loro vacanze nel periodo in cui si aspettano di trovare la situazione climatica migliore.

Secondo gli studi realizzati a livello nazionale per la SNACC, i cambiamenti climatici, modificando il tipo di clima percepito dai turisti, influenzano **l'attrattività turistica** di un territorio, ed è quindi probabile che provochino uno spostamento dei flussi turistici verso maggiori latitudini e altitudini e/o verso periodi dell'anno in cui le condizioni climatiche siano diventate migliori, modificando il numero di presenze, di turisti sia internazionali che italiani, tipico di determinate località e periodi. Può avvenire, comunque, che i turisti continuino a prediligere le stesse località e periodi, ma che siano indotti a cambiare il tipo di attività svolte (es. praticare escursionismo anziché sciare).

Nella tabella 2.15.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sugli insediamenti urbani descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto), integrati con alcune considerazioni di esperti del settore in merito al contesto regionale.

Tabella 2.15.1– Impatti dei cambiamenti climatici sul turismo descritti a livello nazionale e riferiti al FVG

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Turismo balneare	Turismo montano invernale	Turismo montano estivo	Turismo rurale e naturali-stico	Turismo culturale			
X		X	X	X	**Variazione della stagione turistica**	Spostamento del flusso di turisti dai mesi caldi estivi ai mesi primaverili e autunnali (es. nelle aree balneari) per la ricerca di periodi con temperature meno estreme. Accorciamento della stagione turistica invernale.	Aumento delle temperature, calo delle precipitazioni nevose
X	X	X	X	X	**Variazione dell'attrattività e cambio delle destinazioni turistiche**	Le peggiori condizioni climatiche rendono alcune località meno attrattive per i turisti, che sceglieranno mete a maggiori latitudini e altitudini dove le condizioni climatiche saranno più favorevoli.	Aumento delle temperature, calo delle precipitazioni nevose, aumento degli eventi estremi
X	X	X	X		**Cambio del tipo di attività svolte**	Peggioramento delle condizioni climatiche adatte allo svolgimento di attività come quelle sportive invernali o quelle estive all'aria aperta, e conseguente modifica delle attività svolte durante il periodo di vacanza.	Aumento delle temperature, calo delle precipitazioni nevose
X	X				**Aumento dei costi dei servizi turistici e dei relativi prezzi**	Aumento dei costi per la gestione delle infrastrutture e delle attività turistiche a causa della maggiore richiesta di neve artificiale in montagna e per l'aumento della competizione idrica ed energetica in estate. Necessità di costosi interventi per contrastare l'innalzamento del livello del mare e per proteggere le strutture dagli eventi meteorologici violenti.	Aumento delle temperature, calo delle precipitazioni nevose, maggior durata dei periodi siccitosi, calo delle riserve estive di neve

X	X	X	X	X	**Aumento dei rischi per la salute dei turisti**	Maggiore incidenza di colpi di calore, scottature e tutti i fenomeni legati ad un'eccessiva insolazione, aumento dei rischi conseguenti al verificarsi di eventi estremi, come mareggiate, alluvioni, smottamenti e incendi boschivi.	Aumento delle temperature, aumento delle ondate di calore, allungamento dei periodi siccitosi, aumento della frequenza degli eventi estremi
X	X	X	X	X	**Aumento delle situazioni di carenza idrica**	Riduzione delle risorse idriche disponibili, aumento dei conflitti per l'uso della risorsa e dei costi per l'approvvigionamento idrico.	Aumento delle temperature, maggior durata dei periodi siccitosi
X	X	X	X	X	**Modifica del valore paesaggistico del territorio**	Modifica dell'estetica del territorio dovuta al cambiamento del paesaggio per lo spostamento delle aree vegetative e la variazione della biodiversità, e alla riduzione della qualità e salubrità ambientale per l'aumento di fioriture algali e batteriche e il ridotto rimescolamento delle acque; per l'installazione di manufatti e infrastrutture di adattamento ai cc.	Aumento delle temperature, calo delle precipitazioni nevose, aumento della frequenza degli eventi estremi
			X		**Modifica delle condizioni per il turismo lacustre**	Allungamento del periodo di tempo con condizioni termiche favorevoli alla balneazione e sport acquatici, compromissione della qualità delle acque lacustri, riduzione della navigabilità per l'abbassamento del livello delle acque.	Aumento delle temperature, calo delle precipitazioni nevose, allungamento dei periodi siccitosi
x		X			**Aumento del turismo montano estivo**	Allungamento della stagione favorevole alle attività escursionistiche e di villeggiatura montane, maggiore competitività con le località di villeggiatura balneari.	Aumento delle temperature primaverili e autunnali
X				X	**Riduzione dell'attrattività delle zone costiere**	Perdita di terreno e infrastrutture rilevanti per le attività turistiche, come spiagge e porti, costruzione di barriere artificiali e degrado estetico del territorio, aumento dei costi di gestione, calo della disponibilità di acqua potabile per l'allungamento dei periodi siccitosi e l'intrusione di acque saline nelle riserve idriche.	Innalzamento del livello del mare, allungamento dei periodi siccitosi, aumento della frequenza degli eventi estremi

Parlando nello specifico del turismo in Friuli Venezia Giulia, il numero di arrivi nel 2016 ha raggiunto i 2,3 milioni, con un aumento del 6,5% rispetto al 2015, mentre i pernottamenti sono stati 8,3 milioni (con un +4,8%). Circa la metà degli arrivi sono di origine straniera, e circa un turista su cinque è di provenienza austriaca (18,4%); in valore assoluto la presenza più cospicua è quella di austriaci e tedeschi con mezzo milione di arrivi. La maggioranza delle presenze turistiche si concentra nelle località dove l'aumento delle temperature e degli eventi meteorologici estremi potrebbe portare i disagi maggiori. Infatti le località balneari si confermano la meta preferita del 61,0% dei turisti, seguite dai capoluoghi (1,4 milioni di presenze) e dalla montagna (873 mila). Si registra una forte crescita per il turismo "verde", con un aumento delle presenze negli alloggi agrituristici (+7,2% sul 2015) e negli alberghi diffusi (+16,9%). Il comparto turistico, con un valore aggiunto che sfiora gli 1,2 miliardi di euro ed oltre 30 mila occupati (il 6,0% del totale), riveste un ruolo sempre più importante nell'economia regionale, in particolare in aree economicamente svantaggiate come la montagna o i piccoli centri urbani con tradizioni storiche e culturali. Le imprese legate al turismo e all'ospitalità rappresentano il 9,3% del tessuto produttivo regionale, e tale quota sale addirittura al 17,1%. nell'area montana. (Rapporto statistico annuale 2017)

Impianto di innevamento artificiale, Piani di Luzza (Forni Avoltri, UD)

Per quanto riguarda il **turismo montano invernale**, gli effetti dell'aumento di temperatura sulla copertura nevosa porteranno probabilmente a una **risalita della Linea di Affidabilità della Neve (LAN),** ovvero l'altitudine media oltre la quale le precipitazioni nevose e la temperatura garantiscono almeno 100 giorni all'anno con uno spessore di 30 cm di neve. Un comprensorio sciistico è considerato "affidabile" quando più del 50% del suo territorio si trova ad una quota superiore alla LAN. Questa quota può variare nel tempo e a seconda delle caratteristiche climatiche delle specifiche aree geografiche: considerando in generale le Alpi italiane, nel periodo 1961-1990 tale limite si attestava intorno ai 1500 metri di altitudine, ma nei decenni successivi è salito a quote maggiori. Alcuni studi stimano una

variazione di quota di 150 m per ogni 1 °C di aumento di temperatura, ma altri sembrano indicare una risalita anche maggiore. La riduzione della copertura nevosa potrebbe quindi determinare una maggiore necessità di ricorrere all'innevamento artificiale, con conseguente aumento dei costi di gestione per via dei **maggiori consumi** di acqua e di energia e con le relative ripercussioni sui prezzi per i turisti.

Se da un lato le attività sportive sulla neve potrebbero essere penalizzate, dall'altro le **attività alternative**, come le escursioni a piedi o in bicicletta, potrebbero beneficiare di una **stagione turistica più lunga**, con temperature più favorevoli in primavera e autunno. Questo effetto potrebbe in parte compensare il calo di presenze turistiche invernali.

Potranno beneficiare di un allungamento della stagione turistica anche il turismo balneare e quello rurale e naturalistico; si potrebbero però verificare dei disagi per eventuali **carenze idriche**, a causa del calo delle precipitazioni estive e del minor apporto di acqua dalle riserve nevose alpine, e per le **ondate di calore** estive più frequenti ed intense.

Problema ancora poco esplorato è infine quello che deriva dalle previsioni di innalzamento del livello del mare che potrà andare ad impattare sui servizi e sul turismo balneare

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 48-49
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 591-625
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 308-324

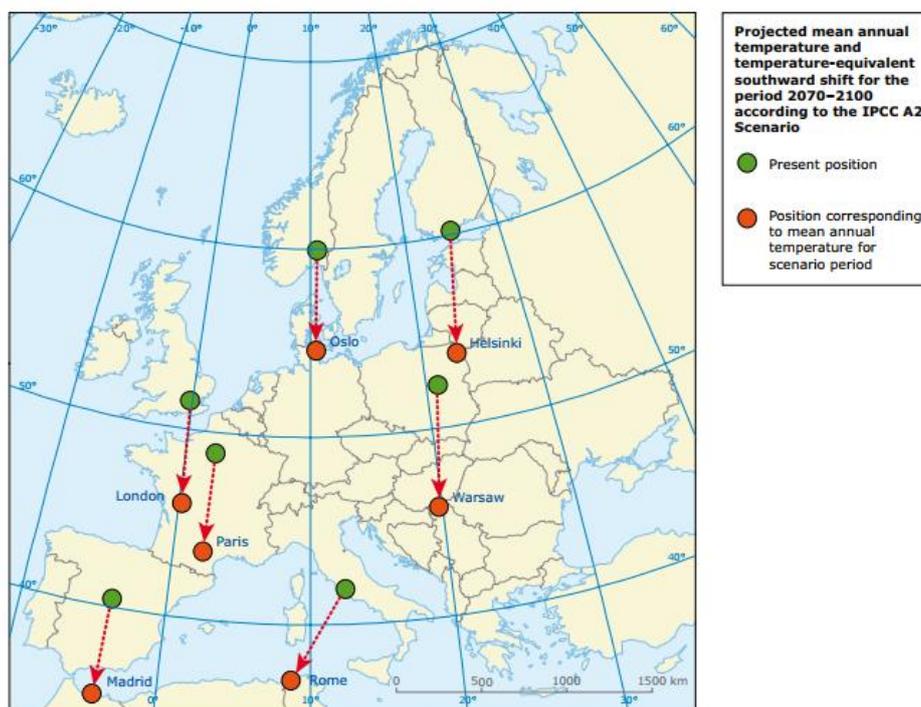
Altre fonti consultate:

- *Rapporto statistico annuale 2017*, Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, 2017
- Valt M., Cianfarra P. (2013) - *Variazioni climatiche e manto nevoso sulle Alpi italiane*, *Neve e valanghe* n. 80,. 12-19. http://www.aineva.it/pubblica/neve80/nv80_rivista-3.pdf

2.16 Insediamenti urbani

Gli insediamenti urbani sono i principali responsabili e le maggiori "vittime" del cambiamento climatico, dove si concentrano un'elevata quantità di soggetti e attività potenzialmente più sensibili e vulnerabili. I principali fattori di stress climatico per gli insediamenti urbani sono gli eventi di precipitazione intensa, ovvero i giorni con precipitazione giornaliera superiore ai 20 mm o al 95° percentile della precipitazione, gli eventi estremi di temperatura e le ondate di calore, che portano rischi per la salute sia diretti (stress da caldo) che indiretti (riduzione della qualità dell'aria, interruzione dei servizi, ecc.).

La *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNACC) dedica un capitolo specifico agli insediamenti urbani, sebbene gli impatti dei cambiamenti climatici ivi descritti siano per la maggior parte ricompresi nella trattazione degli impatti su diversi settori, quali salute e infrastrutture. Anche nella presente ricognizione si è scelto di mantenere questa impostazione, che consente di offrire una visione d'insieme dei diversi tipi di impatti che le aree urbane subiscono e potranno subire con i mutamenti delle condizioni climatiche già rilevati e attesi in futuro.

fig. 2.16.1 - Apparente spostamento verso sud delle città Europee, a causa del cambiamento climatico, per il periodo 2070-2100 (EEA, 2009)

Nella tabella 2.16.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sugli insediamenti urbani descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

tab. 2.16 1 – Impatti dei cambiamenti climatici sugli insediamenti urbani descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)			IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Livello di benessere	Infrastrutture	Contesto naturale			
X			**Peggioramento della salute e del benessere insediativo della popolazione**	Peggioramento della salute e sul benessere insediativo sia per l'aumento dei picchi di calore (amplificati dall'effetto isola urbana di calore), che per il peggioramento della qualità dell'aria per l'effetto delle alte temperature sulle varie componenti atmosferiche (PM, ozono, ecc.).	Aumento della frequenza degli eventi estremi (ondate di calore)
X			**Riduzione dei momenti di socialità e peggioramento della qualità di vita**	Minore frequentazione degli spazi pubblici e dei luoghi di incontro, peggioramento della qualità di vita di determinate fasce di popolazione, disagi per l'interruzione dei servizi e per i danni ad abitazioni e strutture.	Aumento della frequenza degli eventi estremi
X	X	X	**Aumento dei danni alle infrastrutture e ai beni culturali e paesaggistici**	Danni a ponti, strade, impianti di depurazione, reti idriche, reti elettriche e di telecomunicazione, ma anche a abitazioni, edifici pubblici, beni di interesse culturale, parchi e giardini storici.	Aumento della frequenza degli eventi estremi (alluvioni, temporali forti)
X	X	X	**Aumento degli allagamenti**	Incremento delle portate di piena e messa in pericolo anche di aree in passato considerate sicure. Aumento della franosità del territorio.	Aumento degli eventi meteorologici estremi (piogge intense)
X		X	**Variazione della biodiversità urbana e calo delle aree verdi**	Cambiamento della biodiversità urbana per aumento dello stress per gli habitat naturali e l'arrivo di specie aliene tropicali. Riduzione delle aree di verde pubblico.	Aumento delle temperature medie, riduzione della piovosità estiva
X	X	X	**Aumento dei problemi di approvvigionamento idropotabile**	Aumento delle carenze negli approvvigionamenti idropotabili per l'allungamento dei periodi siccitosi estivi e il peggioramento della qualità delle acque.	Riduzione della piovosità estiva
X	X		**Problematiche per il rifornimento di energia**	Maggiore probabilità di black-out per incrementi improvvisi della domanda energetica, dovuti alla elevata climatizzazione di abitazioni e luoghi di lavoro durante i picchi di calore.	Aumento della frequenza degli eventi estremi (ondate di calore)
X			**Danni al sistema socio-economico**	Peggioramento delle condizioni economiche e competitive, soprattutto negli insediamenti dove il sistema produttivo è basato su agricoltura, selvicoltura, pesca o turismo. Danni alle imprese e blocco della produzione, perdita di posti di lavoro, calo della produttività lavorativa.	Variazione delle condizioni climatiche tipiche del luogo, aumento degli eventi meteorologici estremi
			Aumento dei costi per le istituzioni pubbliche	Necessità di destinare ingenti risorse umane ed economiche a servizi sanitari e di prevenzione dei rischi, nonché al ripristino di strutture danneggiate dagli eventi estremi. Aumento dei costi assicurativi. Incertezza nella pianificazione dell'uso del suolo a lungo termine e nella progettazione di infrastrutture.	Aumento degli eventi meteorologici estremi
X	X	X	**Aumento delle inondazioni nelle zone costiere**	Allagamento degli insediamenti costieri poco elevati, perdita di porzioni di spiaggia e patrimonio pubblico,	Innalzamento del livello del mare, aumento degli eventi meteorologici estremi (mareggiate)

Gli impatti dei cambiamenti climatici sugli insediamenti urbani sono molto vari e comprendono effetti (descritti anche in altri capitoli della SNACC) sulla salute e sulla qualità della vita, in particolare delle fasce deboli della popolazione; impatti fisici su edifici, infrastrutture idriche, energetiche, dei trasporti e sul patrimonio culturale; impatti sulla produzione e la fornitura di energia. I cambiamenti climatici tendono ad **accentuare criticità già presenti** negli insediamenti urbani; ad esempio parti di città già affette da difficoltà di drenaggio o da un rilevante rischio idraulico potrebbero essere interessate da fenomeni ancor più severi a causa del mutato regime delle piogge, così come zone particolarmente sottodotate di verde urbano vedranno diminuire ulteriormente la propria qualità insediativa a causa dell'effetto ancora più marcato delle ondate di calore. La tipologia e l'intensità di questi impatti varia a seconda dei diversi contesti locali e la loro intensità cresce con la dimensione dell'insediamento urbano. Negli insediamenti di grandi dimensioni, infatti, alcuni impatti sono esaltati dal fenomeno dell'**isola di calore urbano** che porta ad un aumento medio anche di qualche grado delle temperature nelle parti centrali delle città rispetto a quelle periferiche ed extraurbane.

Gli eventi di precipitazione intensa espongono le città a rischi provocati principalmente dall'esondazione di fiumi e torrenti o dei sistemi di deflusso delle acque superficiali, e possono creare problemi per la circolazione e per l'agibilità delle infrastrutture più basse come sottopassi, metrò e i piani inferiori degli edifici. Il processo di urbanizzazione scarsamente controllato ha spesso favorito le aree alluvionali e i fondo valle e ha contribuito, assieme alla cementificazione del territorio e dei corsi d'acqua, all'aumento del rischio idrogeologico delle aree urbane e quindi alla vulnerabilità agli eventi di pioggia intensa.

Il calo delle precipitazioni in estate potrebbe portare a situazioni di siccità e aumentare la competizione tra i diversi usi dell'acqua potabile.

Le temperature estive troppo alte riducono lo **stato di benessere** della popolazione e portano ad una minore frequentazione degli spazi pubblici e dei luoghi di incontro e al peggioramento della qualità di vita, soprattutto per determinate fasce di popolazione come quelle a minor reddito, i malati, gli anziani soli, gli immigrati e le persone con condizioni abitative precarie, che non possono dotarsi di adeguati sistemi di raffrescamento per le proprie abitazioni.

Il disagio psicofisico può essere provocato anche da alluvioni o altri eventi meteorologici estremi, che possono rendere inagibili e danneggiare abitazioni e infrastrutture, interrompere i servizi, alterare il traffico e compromettere le normali attività lavorative.

FOCUS L'isola di calore urbano

Essendo un sistema artificiale, l'ambiente urbano è caratterizzato dalla presenza di superfici ricoperte da cemento e asfalto e con poche aree di carattere naturale (suolo e vegetazione). L'**isola di calore urbano** è il fenomeno fisico che comporta, nelle aree centrali delle città, temperature più alte di quelle che si registrano nelle aree limitrofe, rurali o semi rurali. Ciò è dovuto alla maggiore capacità delle città di catturare le radiazioni solari e conservare il calore, alle fonti di calore interne e all'impermeabilizzazione dei suoli operato da palazzi e strade, che impedisce la naturale traspirazione. Gran parte del suolo risulta impermeabilizzato dall'asfalto ed estremamente secco, mentre gli edifici, attraverso i loro materiali di costruzione e le superfici lisce, assorbono la radiazione solare (diretta e riflessa dalle superfici circostanti come raggi infrarossi) accumulando e liberando calore che va ad aggiungersi a quello proveniente dai processi di combustione dei veicoli, dall'industria e dagli impianti di climatizzazione. La scarsità di vegetazione, l'abbondanza di superfici riflettenti, la densità e altezza delle costruzioni contribuiscono ad amplificare questo effetto. Il fenomeno delle isole di calore non è un evento solo estivo, ma si manifesta in maniera per lo più costante durante tutto il corso dell'anno anche se diviene maggiormente percepibile in estate in occasione dei caldi estremi. Gli impatti maggiori di questo fenomeno si verificano nelle **ore notturne**, durante le quali il calore assorbito dalle costruzioni durante tutto l'arco della giornata viene lentamente rilasciato e fa dunque registrare, in inverno come in estate, le differenze maggiori tra le temperature dentro e fuori l'insediamento urbano. Il numero delle notti tropicali nell'arco dell'anno è aumentato sensibilmente in tutta Italia, con un incremento del 50% dal 1961 al 2005 delle notti in cui si registrano più di 20 gradi.

Le conseguenze principali dell'effetto isola di calore si registrano sulla salute a causa dello **stress termico** che causa un aumento della mortalità per cardiopatie ischemiche, ictus, nefropatie o disturbi metabolici. Particolarmente vulnerabili sono i pazienti con patologie già in atto, gli anziani sopra i 75 anni, i bambini e le persone che vivono in condizioni economiche svantaggiate, ma anche i lavoratori esposti all'aria aperta per motivi professionali (lavoratori outdoor). L'incidenza di questi impatti è emersa in modo preponderante in occasione dell'ondata di calore dell'estate del 2003, in cui in Europa è stato stimato un aumento dei decessi di 70.000 casi, in particolare ultra 75enni, mentre in Italia, in alcune città del nordovest, gli incrementi di mortalità negli anziani hanno superato il 30%. Le isole di calore non compromettono la salute solo per l'eccesso di temperatura, ma possono provocare anche un **aumento delle polveri sottili,** a causa della maggiore capacità di sospensione delle polveri secche e dell'esistenza di più forti correnti ascensionali dal suolo, un **aumento del tasso di ozono** a bassa quota (per l'interazione fra gas climalteranti, calore e radiazioni ionizzanti) e modificazioni microclimatiche che tendono a far variare la circolazione atmosferica di bassa quota e a modificare la piovosità specifica.

L'effetto isola di calore è stato oggetto di uno studio avviato nel 2014, promosso dal Comune di Udine e condotto sotto la direzione scientifica dell'Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia (UMFVG), a cui hanno partecipato anche tecnici di ARPA FVG. Il progetto è stato sviluppato mediante un approccio di "citizen science" (volontari che gestiscono dei rilevatori portatili di temperatura) con un duplice scopo: individuare l'estensione e le caratteristiche dell'isola di calore urbano a Udine ai fini della pianificazione e gestione del territorio; individuare gli eventuali effetti dell'isola di calore urbano sulla serie storica secolare di temperature a Udine. In base ai risultati ottenuti si è visto come la città di Udine abbia un chiaro effetto sulle temperature minime, che risultano significativamente più elevate al centro della città rispetto alla periferia. In altre parole, l'energia termica accumulata dalle aree urbanizzate e quella dispersa dagli edifici contribuisce a mantenere "meno freddo" il centro cittadino. Meno evidente è invece l'effetto termico della città sulle temperature massime. Nel dettaglio, su tutta l'area urbanizzata di Udine si possono rilevare temperature massime grossomodo analoghe, solo in giornate e momenti diversi. L'effetto delle aree urbanizzate di

Udine produce un aumento locale della temperatura, ma questo effetto viene modulato e traslato su punti diversi della città in momenti diversi. Per questo motivo si ritiene che quella che si crea su Udine sia più simile ad una "bolla di temperatura massima" più che ad una vera e propria "isola di calore". Questo effetto è dovuto anche alle dimensioni della città di Udine, che non sono tali da produrre un'area estesa con temperature massime elevate.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 40-41
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 628-653
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 234-251

Altre fonti consultate:

- EEA Report no. 5 (2009) - *Ensuring Quality of Life in Europe's Cities and Towns*
- Buricelli S., Colucci R.R., Galluccio P., Milocco R., Molinari L., Noacco L.C., Nordio S., Pistrin G., Pieri F., Stampetta R., Villani A., Stel F., 2015, *Urban Heat Island or Urban Heat Bubble?* (slides) http://cmsarpa.regione.fvg.it/export/sites/default/tema/aria/utilita/Documenti_e_presentazioni/conferenze_seminari_docs/2015_09_09_ems_heat_island.pdf
- Stel F. - *Relazione tecnica sul progetto "Isola di calore urbano a Udine* (Udine Urban Heat Island –U 2HI), Unione Meteorologica del Friuli Venezia Giulia
- Antolini G. (ARPAE), Giordano F. (ISPRA), Flapp F. (ARPA Friuli Venezia Giulia), Pelosini R. (ARPA Piemonte), 2017, INDICATORI D'IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI INAMBIENTE URBANO in XIII Rapporto Qualità dell'ambiente urbano - Edizione 2017, cap. 10 AZIONI E STRUMENTI PER LA SOSTENIBILITÀ LOCALE - http://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/stato-dellambiente/xiii-rapporto-qualita-dell2019ambiente-urbano-edizione-2017

FOCUS Valutazione dei Servizi Ecosistemici in ambiente urbano come strumento per l'adattamento ai Cambiamenti Climatici

Giovanni Bacaro, Marco Carpona, Enrico Tordoni, Rossella Napolitano, Stefano Martellos - Università di Trieste

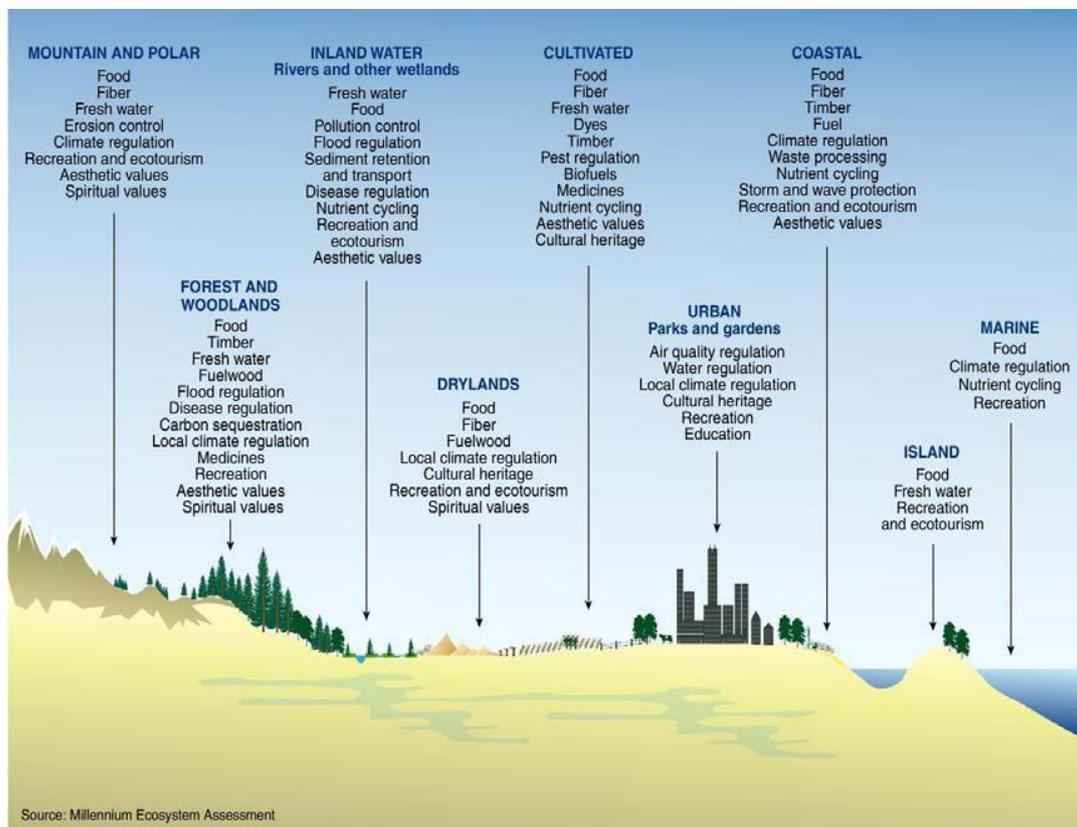
Sulla Terra la maggior parte della popolazione vive in aree urbane. Se nel 1950, il 30% della popolazione mondiale viveva in zone urbanizzate, nel 2014 il valore è aumentato al 54%. Inoltre, si stima che nel 2050 questo valore raggiungerà il 66% (UN, 2014). Il rapido accrescimento della popolazione urbana, coniugato al crescente effetto dei cambiamenti climatici, richiede con ritmo crescente l'elaborazione di strategie per l'adattamento a circostanze climatiche antropologicamente modificate. Una di queste strategie è quella di considerare la componente vegetazionale delle città come parte di un ecosistema naturale urbano, il quale ha la capacità di intervenire favorevolmente sulla salute pubblica, migliorando la qualità sia della vita dei cittadini (Kiss et al., 2015) che dell'ambiente stesso. Tutto ciò ha portato alla definizione dei cosiddetti servizi ecosistemici come parte del del "Capitale Naturale", ovvero l'intero stock di beni naturali (organismi viventi, aria, acqua, suolo e risorse geologiche) che contribuiscono alla sopravvivenza del genere umano e dell'ambiente stesso, fornendo beni e servizi di valore, in modo diretto ed indiretto (Comitato Capitale Naturale, 2017). In figura 1 vengono identificati vari tipi di ecosistemi, che forniscono una moltitudine di servizi dipendenti da complesse relazioni biologiche, fisiche e chimiche, condizionate a loro volta dalle attività umane, in particolare negli ecosistemi urbani.

Gli ecosistemi urbani naturali contribuiscono alla salute pubblica, migliorando la qualità di vita dei cittadini, grazie alla fornitura di beni e servizi, diretti ed indiretti, capaci di risolvere problemi locali tipici delle città, come l'inquinamento acustico, o il traffico. Bolund et al. (1999) prendono in considerazione diversi SE legati all'ecosistema urbano, in particolare per la città di Stoccolma, focalizzandosi su 6 SE (come definiti nello studio di Costanza et al., 1997), fornendo una descrizione specifica di ogni SE, e concentrandosi sui seguenti quesiti:

1) Quali problematiche può risolvere ciascun SE?

2) Quali ecosistemi sono coinvolti nell'erogazione di ciascun SE?

3) Come può venire valutato e quantificato ciascun SE?

Figura 1: Panoramica dei servizi ecosistemici forniti dai principali ecosistemi, tra cui quello urbano (fonte: Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

In questo studio, vengno analizzati i seguenti SE.

- **Riduzione dell'inquinamento atmosferico**: il ruolo della vegetazione nel controllare la qualità dell'aria è considerato uno dei maggiori benefici che gli ecosistemi urbani possono fornire. L'inquinamento atmosferico è causato principalmente dagli impianti di riscaldamento e dai trasporti, ma può venire attenuato dalla vegetazione urbana, sia direttamente, tramite l'assorbimento dalle foglie, sia indirettamente, in quanto le piante possono essere un ostacolo per il vento, influenzando la concentrazione locale degli inquinanti atmosferici. La capacità di filtrare l'aria è dipendente dalla superficie delle foglie, quindi gli aghi di conifera risultano avere maggiori capacità di filtrazione rispetto alle foglie decidue (Stolt, 1982). Questi inoltre permangono anche d'inverno, continuando così a fornire questo SE in tutto il corso dell'anno. Nel 1994, gli alberi di New York hanno rimosso circa 1821 tonnellate di aria inquinata, con un valore stimato di tale SE di 9.5 milioni di dollari (https://www.nrs.fs.fed.us/units/urban/local-resources/downloads/Tree_Air_Qual.pdf).

- **Miglioramento del clima**: i materiali con cui vengono costruiti gli edifici e le strade (principalmente asfalto e cemento) modificano il microclima delle città, creando considerabili differenze di temperatura rispetto alle zone adiacenti di periferia. Inoltre, il grande quantitativo di energia prodotto dalle città, non fa altro che aumentare

questo fenomeno, conosciuto come Isola di calore urbano (UHI, Urban Heat Island); nello studio di Akbari e Rose (2001) si evidenziano differenze di temperatura misurate in città e in zone rurali Durante il giorno, la differenza di temperatura tra le aree urbane e quelle rurali va dai 10°C ai 15°C, mentre di notte la differenza è inferiore, dai 5°C ai 10°C. Come spiega lo studio di Bolund et al. (1999), questo servizio viene fornito da tutti gli ecosistemi naturali nelle zone urbane. Infatti, non sono solo i corpi idrici come laghi e fiumi a mitigare le differenze di temperatura. Anche la vegetazione può diminuire l'effetto isola di calore riducendo l'energia usata nelle città, ad esempio ombreggiando le pareti delle abitazioni, e quindi facendo risparmiare energia per il condizionamento in estate, o diminuendo la forza del vento in inverno, limitando così l'impiego del riscaldamento domestico.

- **Riduzione dell'inquinamento acustico**: il traffico, i cantieri, ed altre attività umane, creano livelli di rumore che portano a diversi problemi di salute per gli abitanti delle zone urbane. In questo caso, gli ecosistemi naturali urbani migliorano le condizioni di vita dei cittadini. Ad esempio, l'uso di suoli naturali come i prati, rispetto ai un pavimenti cementati, può ridurre i rumori di 3 dB (Sou, 1993). Inoltre, la vegetazione, specialmente se densa, come nel caso delle siepi, funge da elemento fonoassorbente. Il valore economico di questo servizio fornito dagli ecosistemi naturali urbani deriva principalmente dai costi sanitari ridotti per la comunità. L'esposizione al rumore costante infatti provoca una varietà di effetti negativi sia psicologici e fisiologici.

- **Sequestro di carbonio dall'atmosfera**: Il diossido di carbonio è riconosciuto come una delle principali cause del cambiamento climatico globale, rappresentando oltre l'80% di tutte le emissioni di gas serra nell'Unione Europea (EEA, 2009). Nelle città, uno dei problemi principali è l'elevato numero di trasporti privati, che aumenta le emissioni di questi gas. Inoltre, si stima che le emissioni di diossido di carbonio dovute al traffico stradale, aumenteranno del 92% entro il 2020 (Gorham, 2002; Gratani et al., 2016). La vegetazione urbana, come i parchi pubblici e privati, i giardini, le siepi o i viali alberati, ha un ruolo importante nel ridurre i livelli di diossido di carbonio tramite i processi fotosintetici, ed immagazzinando il carbonio tramite i processi di crescita (Nowak and Crane, 2002; Gratani and Varone, 2006; Novak et al., 2006; Liu and Li, 2012, Gratani et al., 2016). Mediante tali processi, il carbonio sottratto all'atmosfera viene fissato ed accumulato tramite delle componenti ecosistemiche definite come serbatoi agro-forestali di carbonio, o carbon pools.

La quantità di carbonio fissato nei serbatoi agro-forestali e l'equivalente monossido di carbonio sottratto all'atmosfera si quantificano attraverso la misura della biomassa, espressa in termini di peso secco (INFC, 2005). Nel 2003, l'IPCC (Intergovernamental Panel on Climate Change) ha codificato delle linee guida, al fine creare delle stime sui flussi di carbonio nei diversi usi del suolo, tra le parti aderenti al Protocollo di Kyoto, individuando cinque diversi serbatoi agro-forestali:

Biomassa epigea (above-ground biomass), costituita dai tessuti che compongono le parti aeree degli organismi vegetali viventi (fusti, rami, corteccia, foglie, semi e frutti);

Biomassa ipogea (below-ground biomass), costituita dagli apparati radicali degli organismi vegetali viventi;

Necromassa (deadwood), composta dai residui degli organismi vegetali morti;

Lettiera (litter), costituita dai residui più fini della necromassa, come foglie, fiori e frutti non ancora decomposti,

Suolo (soil), costituito dal carbonio organico degli strati organici e minerali.

- **Valori ricreazionali e culturali**: gli aspetti ricreazionali di tutti gli ecosistemi naturali urbani, corrispondono ai SE valutati di più, in quanto forniscono alla città valori estetici e culturali. Un esempio di valori ricreazionali potrebbe essere associato alla presenza di fauna, come uccelli e pesci, nei parchi e giardini. Gli spazi verdi sono in ogni caso psicologicamente importanti, specialmente in strutture come gli ospedali: uno studio ha dimostrato che i pazienti nelle stanze affacciate sul parco hanno avuto una degenza del 10% più veloce rispetto agli altri pazienti. Inoltre, sempre i pazienti ospitati in stanze affacciate sul verde hanno avuto bisogno di trattamenti anti-dolorifici con una percentuale del 50% inferiore rispetto ai pazienti ospitati in stanze affacciate sulle strade (Ulrich, 1984; Bolund & Hunhammar, 1999).

Applicazione del modello "Stoccaggio e sequestro di carbonio" (*InVEST Carbon Storage and Sequestration*) per la stima del quantitativo di carbonio immagazzinato dal verde urbano della città di Trieste.

Per la valutazione dei Servizi Ecosistemici offerti dal verde urbano della città di Trieste è stato utilizzato il modello "Stoccaggio e sequestro di carbonio" (InVEST Carbon Storage and Sequestration), che permette di stimare il quantitativo di carbonio immagazzinato in quattro serbatoi di carbonio legati alla vegetazione (aboveground mass, belowground mass, soil, dead organic matter). Lo stesso modello permette di calcolare il sequestro di carbonio avvenuto in un dato intervallo temporale, in quanto alcuni ecosistemi continuano ad accumulare carbonio nel tempo. Tuttavia, i disturbi provocati a questi sistemi, come gli incendi o i cambiamenti sull'uso del suolo, rilasciano grandi quantità di CO_2. Possedere dei dati spaziali che informino sull'immagazzinamento e il sequestro di carbonio nel tempo permette di eseguire delle migliori politiche gestionali sulle zone di studio interessate, e alcune di queste informazioni possono essere utilizzate per salvaguardare gli ecosistemi.

Classificazione del verde urbano della città di Trieste

I dati inerenti all'area urbana di Trieste sono stati ricavati *inizialmente* dal lavoro di tesi magistrale (Zago, AA 2017). L'area di studio è compresa fra 45°35'51.3233" e 45°40'41.2981" N fra 13°43'59.1594" e 13°48'50.3493" E (*datum*WGS84) e include l'area portuale di Trieste, che si estende anche nel Comune di Muggia, i rioni storici di Chiarbola e Servola sconfinando in quelli di San Vito, San Giacomo, Rozzol, Santa Maria Maddalena superiore e inferiore. La realtà urbana nell'area di studio è stata rappresentata da una classificazione del verde urbano (tabella 1), alla quale è stata impostata un'organizzazione gerarchica, in modo da poter scendere ad un adeguato livello di dettaglio, in funzione dell'uso stesso della classificazione.

Tabella 1: classificazione gerarchica del verde urbano; con gestito si intende un'area sottoposta ad almeno una delle seguenti: irrigazione, sfalcio, concimazione, diserbo, potatura, piantumazione di essenze, presenza di strutture ricreative

Legenda	Denominazione	Descrizione
1	Verde	Aree verdi
2	Non verde	Aree impermeabili
1.1	Verde non gestito	Aree verdi, sia pubbliche che private, non gestite
1.2	Verde gestito	Aree verdi, sia pubbliche che private, di ampia gestione
1.1.1	Praterie naturali	Superficie caratterizzata dalla presenza prevalente di graminacee e leguminose a provenienza spontanea
1.1.2	Arbusteti	Formazione di arbusti che si sviluppa su praterie abbandonate
1.1.3	Bosco	Aree verdi con almeno una copertura arborea del 50%
1.2.1	Prati Urbani e seminati	Superficie caratterizzata dalla presenza prevalente di graminacee e leguminose selezionate o di origine spontanea
1.2.2	Orti e coltivazioni	Superficie caratterizzata dalla copertura di coltivazione prettamente agricola (seminativi, seminativi alberati, orti propriamente detti, uliveti, vigneti, frutteti)
1.2.3	Parchi e giardini urbani	Aree urbane dove la crescita degli alberi è limitata e sono presenti per lo più specie coltivate. Comprende parchi e giardini pubblici, ma anche i giardini delle aziende, delle scuole, dei ricreatori, delle parrochie, delle chiese oppure corti o cortili interni
1.2.4	Verde pensile	Superfici di verde realizzate con una tecnologia appropriata sopra un solaio e destinate alla copertura di tetti, in piano o inclinati, terrazze e superfici
1.2.5	Vivai	Area occupata da un'azienda specializzata nella produzione commerciale di piante
1.2.6	Viabilità	Verde collegato alla mobilità dei mezzi e dei pedoni
1.1.1.1	Praterie xeriche	Praterie che si instaurano su suoli poco profondi (es. calcare), dove il clima presenta periodi di siccità
1.1.1.2	Praterie umide	Praterie che si instaurano su suoli profondi, dove il clima non presenta periodi di siccità
1.2.6.1	Aiuole e siepi di spartitraffico,banchina e marcipiedi	Impianti posti a separazione di due careggiate, ai margini della strada o sui marciapiedi, comprende anche singoli alberi in buche isolate nella pavimentazione
1.2.6.2	Rotonde verdi	Impianti posti nelle rotonde stradali
1.2.6.3	Ferrovia e tramvia	Vegetazione spontanea, spesso invasiva, lungo ferrovie e tramvie

Le categorie di uso del suolo sono state riclassificate in 6 classi (tab. 2), secondo lo schema e i valori dei quattro serbatoi di carbonio proposti da Li et al. (2017).

Tabella 2: classi di uso del suolo e valori di carbonio stoccati nei serbatoi agro-forestali

Classe	Descrizione	c_above	c_below	c_soil	c_dead
1	Urbano	0	0	0	0
2	Verde urbano	94	121	233	0
3	Corridoi ecologici e margini stradali	2	145	200	0
5	Aree boscate	147	140	226	15
8	Zone prative e arbustive	35	7	407	1
9	Aree coltivate	47	81	208	1
10	Mare	28	113	213	1

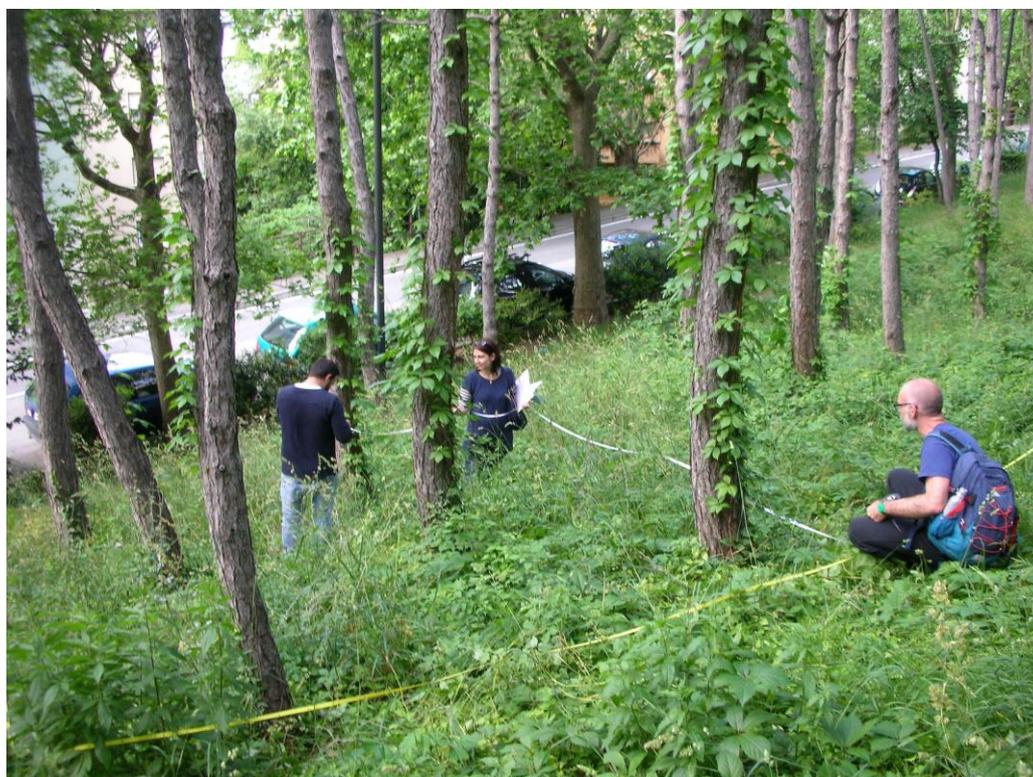
Rilievi della vegetazione in ambiente urbano (Trieste)

La mappa derivante da questa classificazione è riportata in figura 2.

Figura 2 – classificazione dell'area di studio sulla base delle classi di uso del suolo in tabella 2

Modello Applicato

InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) è un software open-source di modellazione, usato per mappare e valutare i beni e i servizi degli ecosistemi naturali.

Questo permette di calcolare sia il carbonio totale sequestrato nell'area di studio, che il valore netto di carbonio sequestrato in un lasso di tempo specifico, assieme alla valutazione economica di tale servizio ecosistemico. Il valore del sequestro di carbonio (e non dell'immagazzinamento, in quanto i prezzi di mercato sono associati solo al sequestro) è stimato in funzione del quantitativo di carbonio sequestrato, del valore monetario per unità di carbonio, e di due tassi di attualizzazione, uno monetario e un altro associato al cambio del valore del sequestro di carbonio nell'unità di tempo. Il tasso di attualizzazione monetaria è un moltiplicatore che solitamente riduce il valore del sequestro di carbonio, in quanto riflette il fatto che la società valuta tipicamente i benefici immediati maggiormente rispetto ai benefici futuri.

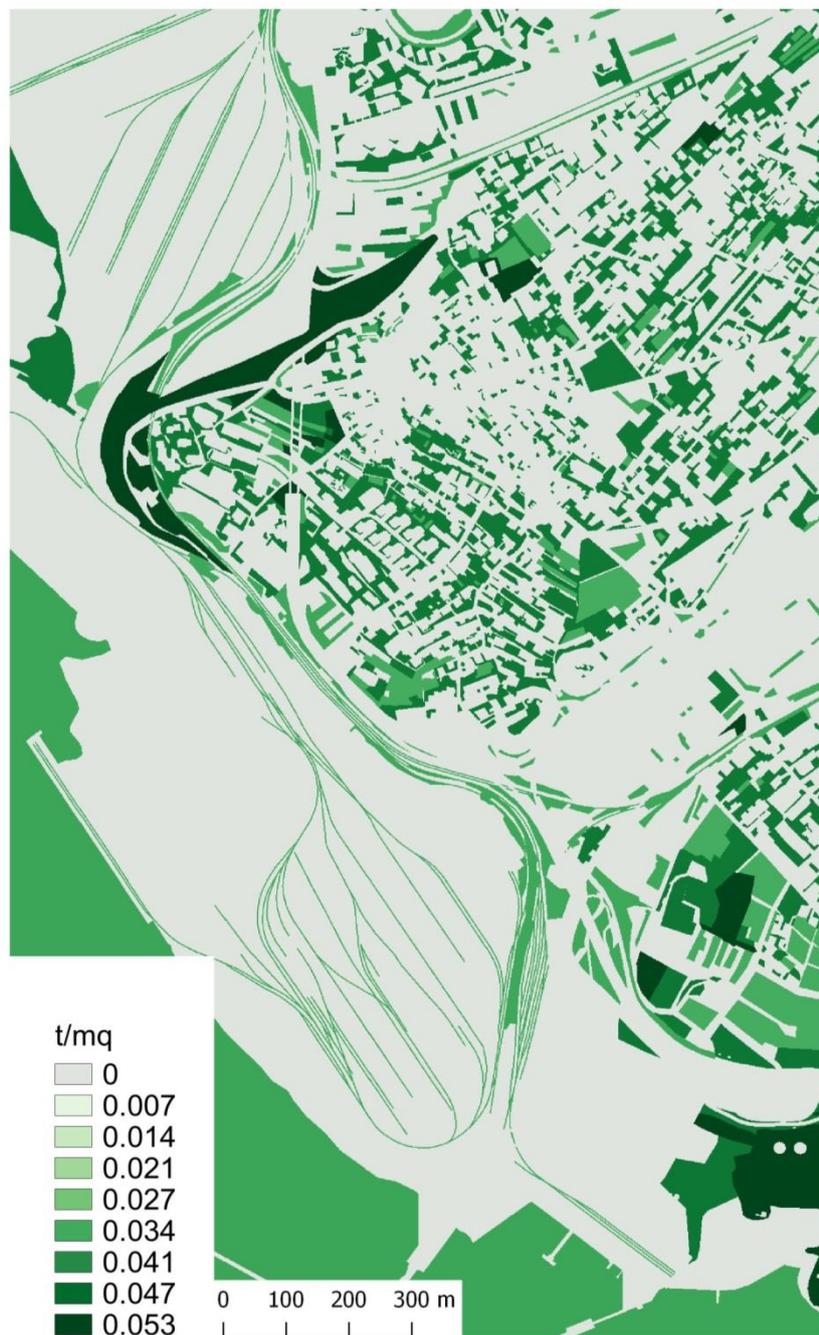
Al fine di valutare l'impatto sul servizio ecosistemico di sequestro del carboni, e quindi della relative perdita di valore economico, è stato simulato uno scenario futuro (2050) in cui il 10% delle aree appartenenti alle classi 2, 3, 8 e 9 (tabella 2) diventi tessuto urbano (classe 1), e divenga quindi incapace di sequestrare carbonio.

L'equazione sotto riportata permette il calcolo del valore del carbonio sequestrato nel tempo per unità di superficie. In questa funzione, *V* rappresenta il valore del carbonio sequestrato, *r* il tasso di attualizzazione monetaria e *c* il tasso annuale del cambio nel prezzo del carbonio.

$$value_seq_x = V \frac{sequest_x}{yr_fut - yr_cur} \sum_{t=0}^{yr_fut - yr_cur - 1} \frac{1}{\left(1+\frac{r}{100}\right)^t \left(1+\frac{c}{100}\right)^t}$$

Per l'elaborazione dello scenario futuro, è stato assunto che il valore di carbonio sequestrato sia di 25$/tonnellata (basato sul prezzo della CO_2 estrapolato da Spring 2016 National Carbon Dioxide Price Forecast), che il tasso di attualizzazione associato alla preferenza della società nel trarre benefici immediati a discapito dei benefici futuri sia del 5%, e che il tasso annuale del cambio nel prezzo del carbonio resti immutato nel tempo.

La figura 3 mostra la quantità di carbonio stoccata nell'area di studio espressa in t/m^2

Figura 3: mappa della quantità di carbonio stoccata nell'area di studio, espresso in t/m^2.

Lo stock attuale di carbonio totale dell'area di studio è di 33219 t per un valore economico di quasi 610000 $. Nello scenario ipotizzato (aumento del tasso di urbanizzazione del 10% entro il 2050) si osserva una perdita di carbonio totale pari a 1800 t (-23341$).

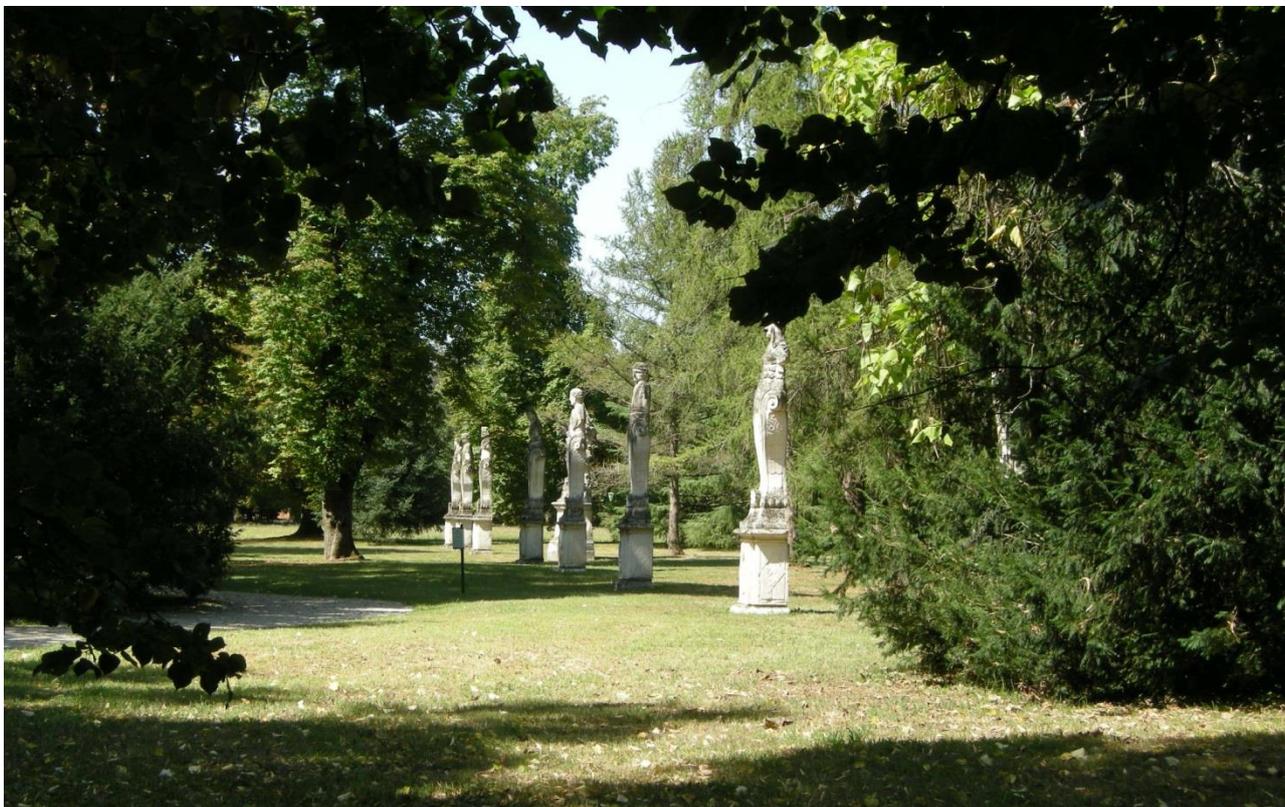
In tabella 3 sono riportati gli stock di carbonio sequestrato e il rispettivo valore economico per ogni classe di uso del suolo sia attuale che futura. Come atteso, la maggior parte del carbonio viene sequestrato dalle aree naturali-seminaturali (71,6%) per un valore economico di circa 436458$; la restante parte viene stoccata dal mare. All'interno

dell'area di studio, le zone che sequestrano una maggior quantità di carbonio (2566 t; 47100$) sono l'area verde di Servola e l'area del Comprensorio ex Esso / discarica di via Errera che stoccano circa l'8% del carbonio totale sequestrato.

Tabella 3. Stock di carbonio sequestrato e il rispettivo valore economico per ogni classe di uso del suolo (2018 e 2050)

		2018			2050		
Classe	**Descrizione**	**Stock C (t)**	**Valore ($)**	**% C**	**Stock C (t)**	**Valore ($)**	**% C**
1	Urbano	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	Verde urbano	11039,85	202581,23	33,23	10130,61	185896,62	32,24
3	Corridoi ecologici	4351,52	79850,40	13,10	3829,58	70272,73	12,19
5	Aree boscate	4015,23	73679,50	12,09	4015,23	73679,50	12,78
8	Aree seminaturali	2264,11	41546,34	6,82	2163,94	39708,22	6,89
9	Aree coltivate	2114,45	38800,16	6,37	1845,25	33860,42	5,87
10	Mare	9433,91	173112,29	28,40	9433,91	173112,29	30,03

I costi qui stimati ovviamente si riferiscono alla situazione attuale. Nell'ottica della crescente pressione derivante dai cambiamenti climatici in atto, e dall'aumento della concentrazione di carbonio in atmosfera, è probabile che il valore V (valore del carbonio sequestrato) vada ad aumentare. Questo renderebbe il valore di questo servizio ecosistemico ancora maggiore, e di conseguenza ancora maggiore sarebbe la stima della sua perdita.

2.17 Patrimonio culturale

Il **patrimonio culturale** è l'insieme dei beni di interesse pubblico che costituisce la ricchezza di un luogo e della sua popolazione per il particolare rilievo storico, culturale ed estetico; vi sono compresi quindi sia i beni artistici che quelli naturali.

Dato che la maggior parte dei beni artistici e architettonici, senza contare quelli paesaggistici, si trova all'aria aperta, è quindi particolarmente esposta agli effetti dei cambiamenti climatici; tuttavia anche i reperti dei siti museali potrebbero diventare più vulnerabili se non si dovesse riuscire a mantenere costanti le condizioni di temperatura e umidità di questi ambienti, specialmente durante il periodo estivo.

Le **risorse naturali e paesaggistiche** potrebbero subire molti tipi di impatti, già riportati nei capitoli cap. 2.3 Desertificazione, degrado del territorio e siccità, 2.4 Dissesto idrogeologico, 2.5 Ecosistemi terrestri e 2.9 Foreste. In questo capitolo tuttavia i beni naturali sono considerati complessivamente in termini di paesaggio, ovvero per la ricchezza estetica che forniscono al territorio.

I cambiamenti climatici possono inficiare **l'integrità dei materiali** che compongono un bene artistico (materiali lapidei, legno o metallo), ma anche essere più ampi e colpire **l'integrità di un sito fisico,** intesa come accessibilità o la vera e propria esistenza, o la **qualità del paesaggio**.

Nella tabella 2.17.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

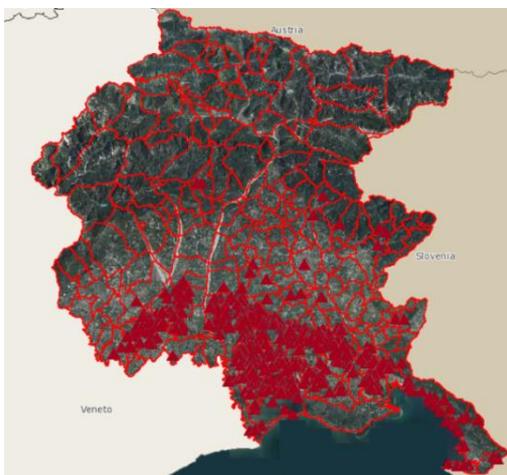
tabella 2.17.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale descritti a livello nazionale (integrata con impatti su siti e paesaggio)

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)			IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Integrità dei materiali	Integrità del sito fisico	Qualità del paesaggio			
X	X		**Aumento dei danni fisici e biologici da alluvione**	Aumento dei danni da abrasione superficiale, crolli e bagnamento dei materiali e dei danni chimico-biologici dopo l'asciugamento.	Aumento nella frequenza di eventi meteorologici estremi (vento forte e alluvioni)
X			**Aumento dei danni da stress termico**	Aumento degli sbalzi termici a cui sono sottoposte le superfici dei materiali e dei danni meccanici da essi causati.	Aumento delle temperature, aumento delle ondate di calore
X			**Riduzione dei danni da gelo-disgelo**	Riduzione dei danni da fratture in seguito a cicli di temperatura intorno a 0°C.	Aumento delle temperature
X			**Variazione delle colonizzazioni microbiche e fungine**	Cambiamenti delle colonizzazioni microbiche e fungine dei materiali artistici per il diverso intervallo di temperature e umidità.	Aumento delle temperature, concentramento delle precipitazioni
X			**Aumento dei danni per sbalzi di umidità**	Aumento delle sollecitazioni ai materiali lignei dovute agli sbalzi di umidità e alla cristallizzazione di Sali solubili all'interno dei pori dei materiali lapidei.	Aumento delle temperature
X			**Aumento dei danni da sale marino**	Aumento della deposizione di cloro sulle superfici per l'aumento dell'aerosol marino.	Innalzamento del livello del mare, aumento delle mareggiate
X	X		**Aumento dei costi di gestione dei beni culturali**	Aumento dei consumi elettrici per il mantenimento delle adeguate condizioni di temperature e umidità nei musei, aumento delle spese per le opere di protezione e restauro dei beni architettonici.	Innalzamento del livello del mare, aumento della frequenza degli eventi estremi, aumento delle temperature
	X		**Perdita di siti a livello del mare**	Sommersione di siti archeologici e beni artistici posti a livello della costa.	Innalzamento del livello del mare
		X	**Costruzione di opere invasive**	Cambiamenti nel paesaggio con la costruzione di barriere architettoniche e impianti per proteggersi dagli effetti del cambiamento climatico (es. barriere mobili contro l'innalzamento del livello del mare, eventi estremi, impianti di innevamento artificiale)	Innalzamento del livello del mare, aumento della frequenza degli eventi estremi, aumento delle temperature
		X	**Cambiamento della biodiversità boschiva e erbacea**	Innalzamento dei limiti altitudinali delle specie vegetali Specie aliene/invasive, aumento delle patologie vegetali o della vulnerabilità e aumento della mortalità del bosco.	Aumento delle temperature, variazione delle precipitazioni
	X	X	**Abbandono del territorio**	Abbandono e disfacimento delle zone colpite da eventi estremi o interessate dall'innalzamento del livello del mare.	Innalzamento del livello del mare, aumento della frequenza degli eventi estremi

I **materiali artistici** potrebbero subire danni a causa del maggiore stress termico estivo e ai maggiori sbalzi di umidità, così come dalle forti raffiche di vento e dall'eccessiva quantità di pioggia che caratterizza i sempre più frequenti eventi meteorologici estremi. I beni artistici e architettonici posti vicino alla costa per l'innalzamento del livello del mare e l'aumento delle mareggiate, potranno essere poi più soggette ad un aumento dei danni provocati dal cloro. Contemporaneamente, verrà a diminuire il rischio di danni da freddo per il congelamento e scongelamento dell'acqua all'interno delle fratture dei materiali. Le colonizzazioni di funghi e licheni che caratterizzano le superfici lignee e lapidee potrebbero essere favorite dalle temperature invernali più miti, e aumentare la loro estensione, ma essere penalizzate dal clima estivo più torrido e arido.

L'aumento dei rischi e dei danni a cui verranno sottoposti i beni artistici e culturali porteranno ad un maggior **carico economico** per questo già affannato settore, sia per i necessari interventi di messa in sicurezza e bonifica delle opere architettoniche e dei siti culturali, sia per un aumento dei consumi dei musei per mantenere un microclima adeguato alla conservazione dei manufatti.

La stessa integrità dei **siti di interesse culturale** potrebbe essere minacciata dall'innalzamento del livello del mare: in regione infatti numerosi siti archeologici si trovano concentrati a livello della bassa pianura e della costa.

Posizione dei siti archeologici in FVG (Carta dei Beni culturali, IPAC FVG) e scavo archeologico di Aquileia

Il **paesaggio regionale** a cui siamo abituati potrebbe poi venire stravolto da opere di adattamento (ad esempio le barriere mobili contro l'innalzamento del livello del mare), dai danni causati dagli eventi meteorologici estremi, dall'innalzamento del livello del mare così come dall'arrivo di specie vegetali più adatte alle nuove condizioni climatiche, che soppianteranno quelle autoctone.

In Regione ci sono 152 giardini o parchi storici, e altri 352 siti di valenza storica e paesaggistica, distribuiti in circa novanta comuni. Trombe d'aria e altri fenomeni meteorologici estremi possono mettere in pericolo gli alberi storici, le statue e l'aspetto complessivo di questi siti. Il mutare delle condizioni climatiche può inoltre creare condizioni ambientali più favorevoli alla proliferazione dei parassiti e causare l'arrivo di nuove patologie vegetali, come pure generare situazioni critiche per il benessere delle piante (siccità, incendi) mettendo a rischio la salute delle specie arboree presenti nei parchi e nelle foreste.

Per approfondire l'argomento:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 50-51
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 675-693
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 388-401

Altre fonti consultate:

- http://www.regione.fvg.it/rafvg/comunicati/comunicato.act?dir=/rafvg/cms/RAFVG/notiziedallagiunta&nm=20130412135608001
- *Parchi e giardini storici del Friuli Venezia Giulia. Un patrimonio che si svela* (2a ed.), AA.VV., Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2014 (www.ipac.regione.fvg.it/userfiles/file/PROGETTI/Pa&Gi_2014.pdf)
- Patrimonio Culturale Friuli Venezia Giulia (sito regionale tematico) http://www.ipac.regione.fvg.it

2.18 Trasporti e infrastrutture

Autostrada A28, loc. Soima-Cormor

La nostra società dipende sempre di più dai trasporti, sia per le attività lavorative che per quelle ricreative, a causa della sua importanza nel garantire lo spostamento di **persone, beni e servizi**. Il settore dei trasporti non comprende solo i mezzi che usiamo per spostarci, ma anche le infrastrutture che li ospitano e che sono necessarie al loro funzionamento, la gestione e l'operatività di tali sistemi e la loro domanda di utilizzo.

Secondo la *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNACC) gli impatti dei cambiamenti climatici riguarderanno tutte queste componenti: comprendono infatti sia effetti sullo **stato delle infrastrutture e sulla loro accessibilità**, che le possibili conseguenze sulla **gestione dei trasporti**, come la riduzione del livello di sicurezza e l'aumento dei disservizi, e sulla scelta del mezzo di trasporto.

Gli impatti si possono suddividere, in base al tipo di trasporto interessato, in impatti su:

- Infrastrutture stradali
- Infrastrutture ferroviarie
- Infrastrutture aeree (aeroporti e piste)
- Infrastrutture per la navigazione
- Trasporto urbano (piste ciclabili, marciapiedi, canali, trasporto pubblico e privato)

Nella tabella 2.18.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sui trasporti descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto)..

tab. 2.18.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sui trasporti, descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)					IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Infrastrutture stradali	**Infrastrutture ferroviarie**	**Infrastrutture aeree (aeroporti e piste)**	**Infrastrutture per la navigazione**	**Trasporto urbano (piste ciclabili, marciapiedi, canali, trasporto pubblico e privato)**			
	X	X	X	X	**Riduzione dei danni da basse temperature**	Riduzione dei danni da gelo sulle infrastrutture e del rischio di congelamento delle strutture e di accumulo di ghiaccio su barche, ponti, attrezzature e moli, diminuzione dei rischi per la viabilità connessi alla presenza di ghiaccio sulle strade	Aumento delle temperature invernali
X	X	X	X	X	**Aumento dei danni da calore**	Aumenta il rischio di stress da espansione termica, che può causare cedimenti dei binari e instabilità delle massicciate, deterioramento e subsidenza del piano stradale, cedimento dei ponti, danneggiamento da fusione delle superfici di asfalto, surriscaldamento dei macchinari e provocare incendi.	Aumento delle temperature estive, aumento delle ondate di calore
X	X	X		X	**Aumento dei danni da eventi meteorologici estremi o loro conseguenze**	Le modifiche nel regime delle precipitazioni riducono la stabilità dei terreni, aumentando il rischio di frane e cedimenti, aumentano il sovraccarico del sistema fognario, gli allagamenti di strade e strutture sotterranee, e i danni da erosione e dilavamento delle strutture, riduzione della sicurezza stradale, aumento dei costi per le riparazioni.	Aumento della frequenza degli eventi estremi
X		X	X		**Riduzione dell'accessibilità alle infrastrutture costiere**	Aumento del degrado di infrastrutture sui litorali e porti a causa di inondazioni, erosione marina e corrosione da sale e minore fruibilità per l'innalzamento del livello del mare	Innalzamento del livello del mare, aumento delle mareggiate
		X			**Aumento dei disagi per il trasporto aereo**	Maggiore necessità di raffreddare le piste per evitare deformazioni e degradazioni dell'asfalto, calo dell'efficienza dei motori e maggior consumo di carburante a causa dell'aumento della densità dell'aria in quota, riduzione della portanza a terra e necessità di allungare le piste. Aumento dei danni e allagamenti alle piste, edifici e strade d'accesso, interruzione dei servizi e dell'accesso da terra. Chiusure periodiche degli aeroporti e costi di manutenzione più alti.	Aumento delle temperature, aumento della frequenza degli eventi estremi
			X		**Aumento dei disagi per la navigazione delle acque interne**	Nei periodi piovosi, innalzamento dei corsi d'acqua e successivi problemi di passaggio sotto i ponti e limiti all'altezza delle navi, riduzione della velocità di navigazione a causa dell'instabilità degli argini. Nei periodi siccitosi, abbassamento del livello dell'acqua e limiti alla capacità di carico delle imbarcazioni, rischi di incagliamento e necessità di ridurre la velocità. Generali disservizi nella navigazione e maggiori costi.	Aumento della frequenza degli eventi estremi, allungamento dei periodi siccitosi
			X		**Difficoltà nella navigazione marittima sulla costa**	Cambiamento dei tassi di sedimentazione e della localizzazione delle secche con chiusure più frequenti e modificazioni nella navigabilità costiera	Innalzamento del livello del mare

Le temperature troppo elevate in estate potrebbero provocare cedimenti a binari, massicciate e ponti, deteriorare il piano stradale e aumentare il rischio di incendi. Hanno l'effetto poi di ridurre la **funzionalità e l'efficienza** dei mezzi di trasporto a causa del surriscaldamento del motore e dell'uso dei sistemi di condizionamento, e influenzano la scelta del mezzo di trasporto nel momento delle ondate di calore. Possono generare inoltre importanti disagi al trasporto aereo: potrebbe essere necessario raffreddare le piste per evitare deformazioni e degradazioni dell'asfalto, inoltre potrebbe ridursi l'efficienza dei motori, perché aumenta la densità dell'aria in quota, portando ad un maggior consumo di carburante e rendendo necessarie piste più lunghe. Si ipotizza invece una riduzione dei danni da gelo-disgelo per le strade, e dell'accumulo di ghiaccio su barche, ponti, attrezzature e moli. Per le infrastrutture localizzate sui litorali e per quelle portuali, i rischi maggiori possono derivare dalla variazione del livello del mare e dall'aumento delle mareggiate.

Ogni tipo di trasporto, dalla viabilità stradale a quella aerea, potrebbe poi essere condizionato negativamente dagli **eventi meteorologici intensi**, come temporali forti, alluvioni e trombe d'aria, sia per possibili danni alle strutture che per gli effetti sulla loro operatività e sulla domanda. Le alluvioni e gli altri eventi meteorologici estremi possono colpire indiscriminatamente tutte le tipologie di trasporto. L'erosione alla base dei ponti o di altre strutture, il cedimento di argini e dei terrapieni, l'allagamento dei sottopassi, il sovraccarico dei sistemi fognari e il danneggiamento delle superfici asfaltate per lo scorrimento delle acque, che accentua danni o imperfezioni preesistenti, sono alcuni dei danni ipotizzabili a carico delle infrastrutture stradali. Ma il rischio maggiore collegato agli eventi piovosi estremi è di natura indiretta, ed è dato dalle frane e dai cedimenti che ne derivano, e che possono interessare le infrastrutture di trasporto. In regione si è assistito ad un aumento dei fenomeni di pioggia intensa, anche accompagnata da vento forte, per cui si può prevedere una crescita di questo tipo di impatti. Per quanto riguarda gli impatti **sull'operatività**, le piogge intense potrebbero aumentare i rischi nella circolazione veicolare a causa della riduzione dell'aderenza e della visibilità, aumentare i disagi e le interruzioni alla viabilità per l'allagamento delle infrastrutture, e rendere difficile la circolazione pedonale e ciclistica nelle aree allagate. Per rimettere in funzione i sistemi di trasporto sono necessari interventi straordinari di manutenzione e pulizia dei residui lasciati dall'allagamento, aumentando così i costi per l'amministrazione pubblica. Questi eventi modificano anche la domanda dei mezzi di trasporto, perché sposta la scelta preferenziale dalla bicicletta o dai mezzi pubblici alla macchina, provocando un aumento del traffico e quindi dell'inquinamento e degli incidenti stradali.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 51-52
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 695-709
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali* (versione di Luglio 2017) – pag. 257-273

2.19 Industrie e infrastrutture pericolose

Il settore industriale (ad eccezione di quello energetico e dei settori strettamente dipendenti alle risorse idriche) viene percepito come non particolarmente vulnerabile ai cambiamenti climatici; invece non è così. Come evidenziato dalla *Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici* (SNACC), l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi, con il loro corredo di fulminazioni, alluvioni e frane, può produrre effetti diretti sia sulle infrastrutture (es. gasdotti, oleodotti, condotte trasportanti sostanze infiammabili o tossiche), che sulle operazioni industriali che in essi vengono svolte, specialmente quelle che utilizzano processi e sostanze chimiche pericolose.

Nella tabella 2.19.1 sono riepilogati i vari impatti dei cambiamenti climatici sulle industrie e le infrastrutture pericolose descritti nei documenti nazionali (SNACC, PNACC e relativi documenti di supporto).

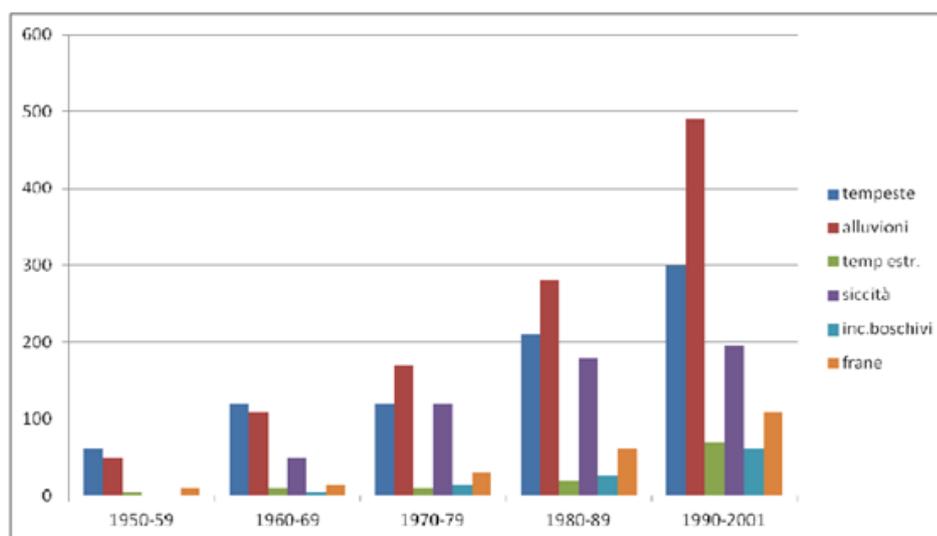
tabella 2.19.1 – Impatti dei cambiamenti climatici sulle industrie e infrastrutture pericolose, descritti a livello nazionale

TIPOLOGIA di IMPATTO (categorie generali)			IMPATTI SPECIFICI	DESCRIZIONE IMPATTI	CAUSE CLIMATICHE
Danni alle infrastrutture	**Rischi per la salute**	**Rischi ambientali**			
X			**Aumento dei danni da eventi meteorologici estremi**	Incremento degli incidenti e dei danni alle industrie ed infrastrutture (gasdotti, oleodotti, ecc.) dovuti ad eventi meteorologici estremi e/o ai loro effetti (es. frane, inondazioni, fulminazioni, ecc.).	Aumento degli eventi meteorologici estremi
X			**Aumento dei pericoli per le industrie a livello costiero**	Aumenta la vulnerabilità per le imprese pericolose situate a livello del mare.	Innalzamento del livello del mare, aumento delle mareggiate
X			**Aumento del rischio di incendi**	Aumenta il numero di incendi che colpiscono gli impianti per l'aumento del numero di fulmini e degli incendi estivi.	Aumento degli eventi meteorologici estremi, riduzione delle piogge estive
	X	X	**Aumento dei casi di inquinamento dei corpi idrici**	I danni da eventi estremi possono comportare lo sversamento nei corpi idrici o in mare di sostanze pericolose per l'ambiente.	Aumento degli eventi meteorologici estremi
	X		**Aumento dei rischi per la salute umana**	Incremento danni a componenti ambientali e salute umana a seguito di incidenti causati dagli eventi meteorologici estremi.	Aumento degli eventi meteorologici estremi
X	X	X	**Aumento degli eventi NaTech**	Eventi nelle quali un disastro Naturale innesca uno o più disastri Tecnologici	Aumento degli eventi meteorologici estremi

Poiché si prevede che la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi, e degli eventi ad essi correlati come fulminazioni, alluvioni e frane, siano destinate ad aumentare a causa dei cambiamenti climatici, è quindi probabile che siano sempre più importanti i loro impatti sulle infrastrutture (es. gasdotti, oleodotti, condotte trasportanti sostanze infiammabili o tossiche) e le attività industriali pericolose (ad es. stabilimenti a rischio di incidente rilevante e altre attività produttive che utilizzano processi e sostanze chimiche pericolosi).

I danni non riguardano soltanto la capacità produttiva, ma la fuoriuscita dagli impianti di sostanze pericolose per la salute e l'ambiente può mettere a rischio sia i lavoratori dell'impianto e la popolazione che vive nelle vicinanze, per la quale agli effetti diretti di un evento meteorologico estremo ulteriori effetti indiretti immediati o differiti (effetti sanitari dovuti all'esposizione a sostanze pericolose, interruzione dei servizi di approvvigionamento idrico, distruzione o inagibilità di abitazioni in conseguenza di incendi ed esplosioni), sia gli ecosistemi delle aree circostanti. La vicinanza degli stabilimenti a rischio ai corpi idrici superficiali (mare, laghi, corsi d'acqua) ne aumenta la vulnerabilità al verificarsi di alluvioni e potrebbe provocare la dispersione di sostanze ecotossiche che al contatto con l'acqua possono generare reazioni violente con rilascio di gas e innesco di incendi ed esplosioni che possono coinvolgere altre apparecchiature (**effetto domino**).

Per scenari di questo tipo è stato coniato il termine **evento NaTech,** che indica un disastro naturale che innesca uno o più disastri tecnologici. Sebbene gli eventi NaTech siano stati in passato avvenimenti relativamente rari, negli ultimi anni si è registrato un loro aumento. Le società moderne sono inoltre più vulnerabili ai loro effetti a causa della maggiore densità di popolazione nelle aree urbanizzate e alla presenza di un maggior numero di industrie e di infrastrutture a rischio, che possono perciò mettere in pericolo la salute di un elevato numero di persone.

figura 2.19.1. – Numero di disastri naturali verificatisi nel mondo nella seconda metà del XX secolo (Sieber, 2012)

Ulteriori impatti connessi ai cambiamenti climatici possono derivare anche dall'innalzamento del livello del mare, che porterà maggiori rischi per le infrastrutture e le attività industriali localizzate sui litorali a causa dell'aumento delle inondazioni e dell'erosione costiera, e dall'aumento del rischio di incendi per la maggiore frequenza di fulminazioni e di incendi boschivi nelle aree circostanti.

Questo testo è stato tratto, sintetizzato e/o rielaborato dai seguenti capitoli dei documenti nazionali:

- *SNACC*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2015 – pag. 53
- *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità e adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2014 – pag. 711-725
- *PNACC - Allegato tecnico-scientifico: impatti, vulnerabilità e azioni di adattamento settoriali*, Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, versione di Luglio 2017 – pag. 283-293

Altre fonti consultate:

- Sieber J. (2012) - *Impacts of extreme hydro-meteorological events on electricity generation and possible adaptation measures*

Parte 3: CASI STUDIO SUGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

3.1 Effetti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica

Paolo Olivo[1], Daniela Iervolino[1], Andrea Cicogna[2], Stefano Barbieri[3]
[1]Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia- Direzione centrale ambiente ed energia- Area tutela geologico-idrico-ambientale-Servizio gestione risorse idriche
[2]ARPA-FVG – S.O.C. Osmer
[3]ERSA –FVG

Utilizzando gli scenari di previsione futura di 5 modelli climatici si sono valutati gli effetti dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica in Friuli Venezia Giulia mediante la realizzazione di un modello di bilancio idrico a scala regionale

Sintesi

Attualmente ogni anno in Friuli Venezia Giulia vengono prelevati 1.872 milioni di m^3 dalle falde, 173 milioni di m^3 dalle sorgenti e 15.151 milioni di m^3 dai corsi d'acqua; quanto derivato viene utilizzato per l'alimentazione della rete acquedottistica, per irrigare, per la produzione di energia idroelettrica, per il funzionamento delle industrie e degli allevamenti ittici e per l'innevamento artificiale. Valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sull'attuale utilizzo dell'acqua ci permette di individuare le strategie di adattamento necessarie a minimizzare l'impatto sull'economia e sulla società. A tal fine sono stati utilizzati gli scenari di previsione futura di 5 modelli climatici per realizzare un modello di bilancio idrico a scala regionale.

Dai risultati della modellazione emerge come l'impatto dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica potrebbe portare ad un aumento complessivo, in termini di volume medio annuo, del quantitativo d'acqua affluito al suolo. E' particolarmente significativo l'andamento non omogeneo durante l'anno della variazione: nei mesi invernali si assiste ad un aumento della risorsa disponibile, cui si contrappone nei mesi estivi un significativo calo. Si osserva inoltre una riduzione delle precipitazioni di tipo nevoso, a causa dell'aumento di temperatura, ed un conseguente aumento di quelle di tipo piovoso.

Evidente anche l'effetto dell'aumento della temperatura media sulla vegetazione: si osserva infatti una maggiore richiesta di acqua con un aumento dei giorni in cui le coltivazioni subiscono uno stress idrico che è necessario compensare con una maggiore irrigazione. La maggiore necessità di irrigazione combinata a un'inferiore disponibilità di risorsa idrica per i corsi d'acqua, nel periodo estivo, potrebbe rendere difficoltoso l'approvvigionamento per l'agricoltura, in particolare nell'Alta Pianura in sinistra Tagliamento, dove il quantitativo di acqua disponibile per l'irrigazione dipende direttamente dalla portata del Fiume Tagliamento.

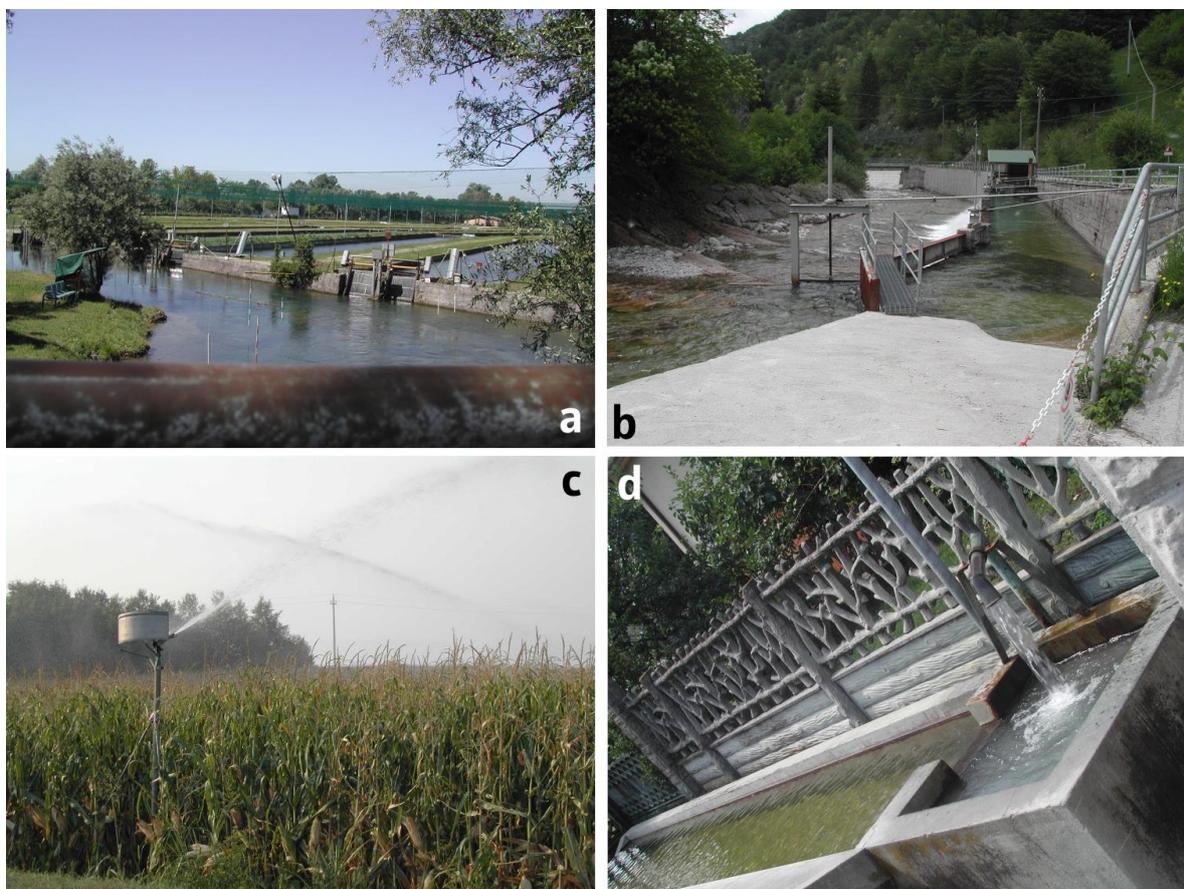
Quanto osservato si riflette anche sul meccanismo di ricarica della falda freatica dell'Alta Pianura che è modificato in particolare nello scenario *business as usual*, dove si assiste ad una diminuzione della ricarica complessiva annua unita a un marcato calo nel periodo estivo.

Risorse idriche del Friuli Venezia Giulia: fiume Lemene presso i Molini di Stalis (a); torrente Cimoliana lungo la strada della val Cimoliana (b); fiume Tagliamento a Madonna del Ponte (c); fiume Livenza a Brugnera (d)

.

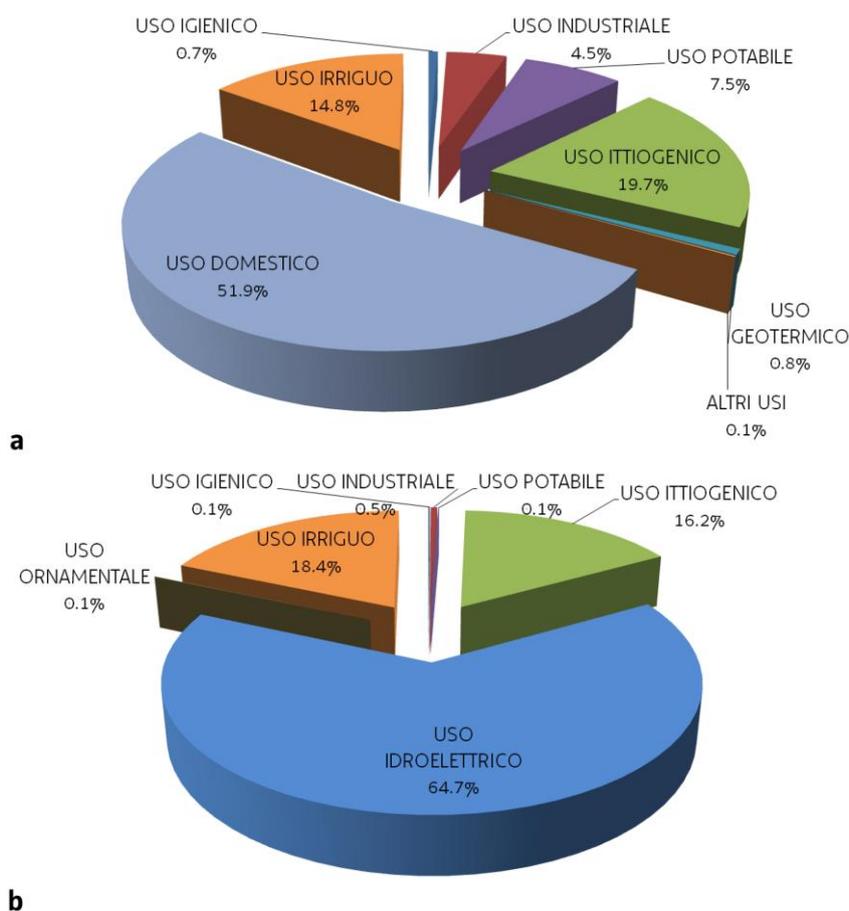
Evidenze attuali

Attualmente ogni anno in Friuli Venezia Giulia vengono prelevati 1.872 milioni di m^3 dalle falde, 173 milioni di m^3 dalle sorgenti e 15.151 milioni di m^3 dai corsi d'acqua (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2015); quanto derivato viene utilizzato per l'alimentazione della rete acquedottistica, per irrigare, per la produzione di energia idroelettrica, per il funzionamento delle industrie e degli allevamenti ittici e per l'innevamento artificiale (fig. 3.1.1).

fig. 3.1.1 – Impianto per l'allevamento del pesce (a); traversa di derivazione dell'acqua da un torrente montano a scopo idroelettrico b); impianto di irrigazione a pioggia (c); pozzo zampillante (d).

La fig. 3.1.2 illustra come sia distribuito tra i diversi usi il prelievo da acque superficiali e sotterranee; in particolare si osserva come la metà dell'acqua derivata dalle acque sotterranee sia destinata all'uso domestico. In questa categoria di uso sono conteggiati tutti quei pozzi ubicati soprattutto nella Bassa Pianura Friulana che siamo abituati a vedere zampillare nei cortili delle case (fig. 3.1.1d). La possibilità di costruire un pozzo a servizio della propria abitazione per esigenze domestiche, per irrigare l'orto o per l'abbeveraggio degli animali, viene consentita dal legislatore ai cittadini a condizione che l'uso dell'acqua non sia legato ad una attività economica e che non vada a discapito dell'equilibrio della risorsa. Tale uso è talmente radicato nella Bassa Pianura che numerosi Comuni sono attualmente privi di una rete acquedottistica. Purtroppo tale diritto è spesso esercitato senza riflettere sulle conseguenze sull'ambiente, considerato che il prelievo d'acqua da pozzo ad uso domestico è molto superiore (circa 72 volte) al reale fabbisogno (Zini *et al.*, 2011).

Non si deve poi dimenticare che l'acqua, oltre ad essere importante per le attività antropiche, è fondamentale per il mantenimento della biodiversità nei corsi d'acqua, oltre ad essere funzionale al paesaggio, al turismo e alle attività di fruizione in generale (es. pesca). Spesso le esigenze tra i vari usi dell'acqua sono contrapposte e allo stato attuale emergono alcune criticità che sono state messe in luce dallo studio "Risorse idriche sotterranee del Friuli Venezia Giulia: sostenibilità dell'attuale utilizzo" (Zini *et al.*, 2011) che ha analizzato le risorse idriche regionali nella loro globalità sia dal punto di vista geologico (individuazione e caratterizzazione degli acquiferi) che idrogeologico/idrologico (portata dei corsi d'acqua, ricarica, deflussi, ubicazione dei punti di prelievo, consumi, redazione del bilancio idrogeologico).

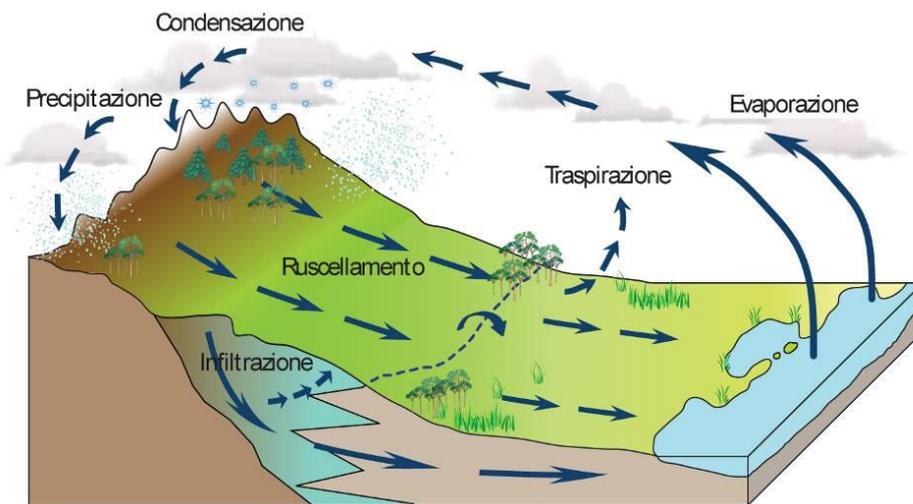
La definizione del bilancio delle risorse idriche elaborato all'interno del suddetto studio ha evidenziato un impoverimento delle falde freatiche e artesiane, in particolare nella Pianura in Destra Tagliamento. Le conseguenze sono tangibili: depressurizzazione degli acquiferi artesiani, arretramento verso valle della fascia delle risorgive e "richiamo" di acqua con caratteristiche qualitativamente meno buone dalla falda freatica di Alta Pianura verso gli acquiferi artesiani pregiati.

fig. 3.1.2 – Distribuzione del prelievo da acque sotterranee (a) e da acque superficiali (b).

Questo squilibrio è da imputare essenzialmente alla mancata ricarica delle falde acquifere a causa della presenza dei grandi sbarramenti idroelettrici/irrigui a ridosso dello sbocco in pianura dei fiumi Cellina e Meduna e all'ingente estrazione di acqua dalla falda artesiana nella Bassa Pianura.

Scopo del presente lavoro è quello di comprendere come potrà modificarsi nel futuro la disponibilità di risorsa idrica e dunque valutare l'impatto dei cambiamenti climatici sull'attuale utilizzo dell'acqua.

Metodologia

L'impatto dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica è stato valutato analizzando le varie componenti del ciclo dell'acqua (fig. 3.1.3). Il ciclo inizia con l'evaporazione dell'acqua dal mare; una gran parte di quest'acqua condensa e ricade sulla superficie sotto forma di precipitazioni (pioggia/neve). Non tutta la precipitazione raggiunge il suolo, in quanto una parte evapora durante la caduta e un'altra è intercettata dalla vegetazione. L'acqua precipitata può, a sua volta, evaporare, essere utilizzata dalle piante, può scorrere in superficie sostenendo la portata dei corsi d'acqua o infiltrarsi nel terreno alimentando le falde sotterranee. Motore di questa successione di fenomeni è l'energia del sole.

fig. 3.1.3 – Il ciclo dell'acqua: evaporazione, traspirazione, condensazione, precipitazione, ruscellamento e infiltrazione sono tutte fasi del ciclo dell'acqua.

L'analisi delle singole componenti del ciclo dell'acqua è importante al fine di quantificare la consistenza delle risorse idriche disponibili e pertanto rappresenta l'analisi conoscitiva fondamentale per pianificare una gestione sostenibile della risorsa stessa.

Nel presente studio il ciclo dell'acqua è stato riprodotto attraverso la realizzazione di un modello idrologico che ha permesso di confrontare lo scenario storico con i diversi scenari di proiezione futura.

Allo scopo di simulare il ciclo dell'acqua, il territorio regionale è stato suddiviso in celle quadrate di lato pari a 500 metri. Per ciascuna cella è stata risolta l'equazione di conservazione della massa che rappresenta sinteticamente il ciclo dell'acqua:

$$\Delta V = P_{tot} - Et_r - R - Inf + f$$

dove:

ΔV = variazione del volume d'acqua immagazzinato nel terreno;

P_{tot} = quantitativo d'acqua di precipitazione;

Et_r = quantitativo d'acqua di evapotraspirazione reale;

R = quantitativo d'acqua di ruscellamento superficiale;

Inf = quantitativo d'acqua di infiltrazione efficace;

f = quantitativo d'acqua da risalita di falda.

La soluzione dell'espressione è stata affidata ad un codice di calcolo appositamente sviluppato: sulla base dei dati giornalieri di pioggia, temperatura e del coefficiente colturale (Kc) forniti per ogni elemento della griglia che rappresenta il territorio regionale, il software modella il ciclo idrologico a passo giornaliero, fornendo come risultati finali le medie mensili sul periodo di osservazione dei parametri idrologici di studio.

In ingresso al modello sono state utilizzate le serie di precipitazione e temperatura minima, media e massima di 5 modelli climatici (HadGEM2-ES_RACMO22E, MPI-ESM-LR_REMO2009, EC-EARTH_CCLM4-8-17, EC-EARTH_RACMO22E, EC-EARTH_RCA4). Per ciascun modello sono stati utilizzati i dati del periodo storico (1976-2005) e di due periodi futuri (2021-2050 e 2071-2100), ciascuno per tre scenari (RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5) per un totale di 35 simulazioni.

Per la descrizione dei modelli e degli scenari si rimanda al cap. 1.2 (Il data set: struttura e utilizzo) così come per la metodologia adottata per l'interpolazione su ognuna delle celle di calcolo dei modelli climatici di precipitazione, temperatura minima, media e massima.

Un ruolo centrale in questo tipo di simulazioni è affidato al terreno che nel presente lavoro è stato modellato come un serbatoio che si riempie d'acqua in funzione della precipitazione, tenuto conto dell'accumulo e fusione nivale e al netto del ruscellamento, e della risalita di falda se presente, e si svuota a causa dell'evapotraspirazione e dell'infiltrazione profonda.

Il contenuto d'acqua disponibile nel terreno (AWC), può variare da un minimo di 0 fino ad un valore massimo (AWC_{max}) che dipende, fra l'altro, dalle caratteristiche pedologiche del suolo e dallo spessore dello strato di terreno. Le caratteristiche pedologiche sono state stimate per ogni cella di calcolo a partire dai dati forniti dal Servizio fitosanitario e chimico, ricerca, sperimentazione e assistenza tecnica dell'ERSA (Michelutti *et al.*, 2003, Michelutti *et al.*, 2006, Rusco *et al.*, 2003).

Nella modellazione del terreno si è tenuto conto anche della profondità massima del suolo esplorabile dalle radici, che dipende dalla tipologia colturale, ed è stata stimata per ogni cella di calcolo.

Il contenuto d'acqua del terreno condiziona l'evapotraspirazione delle colture, la quale viene limitata dalla riserva d'acqua facilmente estraibile dal suolo (riserva facilmente utilizzabile - RFU) che si può stimare essere pari a circa il 60% dell'AWC_{max}. Al di sotto di questa quota la pianta comincia a ridurre i consumi fino ad azzerarli quando l'AWC è pari a zero.

Di seguito si descrive brevemente il modo in cui le singole componenti del ciclo idrologico sono state modellate nel codice di calcolo.

Componente di precipitazione

Per la stima della componente di precipitazione sono stati utilizzati direttamente i dati dei modelli climatologici interpolati secondo quanto descritto sopra.

Nei bacini montani è di particolare rilevanza distinguere tra precipitazione piovosa ($P_{pioggia}$) e nevosa (P_{neve}), e, di conseguenza, risulta fondamentale riprodurre il fenomeno di accumulo e fusione nivale al fine di ottenere una corretta modellazione dei processi idrologici. Il metodo utilizzato è basato sulla temperatura media dell'aria che è

confrontata con due soglie di temperatura (U.S. Army Corps of Engineers, 1956): quando la temperatura media dell'aria risulta maggiore della soglia superiore la precipitazione è classificata come piovosa. Viceversa al di sotto della soglia inferiore la precipitazione è identificata come nevosa. Infine se la temperatura è compresa tra le due soglie, la precipitazione viene considerata di tipo misto. La precipitazione nevosa viene quindi accumulata sulla cella di calcolo finché le condizioni climatiche non sono tali da determinarne la fusione.

La fusione nivale viene calcolato in funzione della differenza tra la temperatura del manto nevoso e una temperatura soglia (Neitsch S.L. *et al.*, 2005). La componente di neve fusa viene quindi aggiunta al bilancio idrico della cella.

A conclusione delle operazioni di calcolo descritte si determina quindi per ciascun giorno di simulazione la precipitazione che effettivamente affluisce al suolo (Aff).

Componente di evapotraspirazione

La componente di evapotraspirazione dipende da numerosi fattori, tra i quali: l'evaporazione di riferimento, la tipologia colturale, ed eventuali fenomeni di stress idrico.

L'evapotraspirazione di riferimento (ET0) viene definita come evapotraspirazione da una superficie a prato, alta 8-15 cm, uniforme e completamente ombreggiante il terreno, non sottoposta a stress idrico (Doorenbos e Pruitt, 1977). ET0 è pertanto un parametro tipicamente climatico in quanto esprime la tendenza a traspirare di una determinata superficie vegetale in funzione dei soli parametri climatici. Per il calcolo dell'evapotraspirazione di riferimento è stata utilizzata la formula di Hargreaves -Samani (Allen *et al.*, 1998).

Per tener conto della tipologia colturale e derivare pertanto l'evapotraspirazione colturale, l'evapotraspirazione di riferimento è stata moltiplicata per un coefficiente (Kc) che ingloba e sintetizza tutti gli effetti sull'evapotraspirazione legate alle caratteristiche morfo-fisiologiche delle diverse specie, alla fase fenologica, al grado di copertura del suolo che le rendono differenti dalla coltura di riferimento. I coefficienti Kc sono stati determinati per ciascuna cella di calcolo e per ogni decade dell'anno, al fine di rappresentare le differenti tipologie vegetazionali diffuse sul territorio regionale e per descrivere la variabilità della fase fenologica.

Per tener conto di condizioni non ottimali di disponibilità idrica nel suolo, e quindi al fine di riprodurre situazioni di stress delle colture, l'evapotraspirazione colturale è stata ridotta secondo un fattore, variabile tra 0 e 1, proporzionale al contenuto d'acqua presente nel terreno nel giorno di simulazione. In questo modo si ottiene l'evapotraspirazione reale (ET_r).

Componente di ruscellamento superficiale

Il calcolo della componente di ruscellamento superficiale (R) è stato effettuato mediante l'utilizzo della metodologia del Curve Number (Soil Conservation Service, 1972).

Il metodo permette di calcolare il ruscellamento superficiale in funzione di un parametro (CN) che misura sostanzialmente il grado di impermeabilità del suolo e descrive pertanto l'attitudine di un territorio a produrre deflusso superficiale; esso varia da 0 a 100: più alto è il suo valore e maggiore sarà il deflusso prodotto a parità di precipitazione. Il paramento CN è stato stimato per ogni cella di calcolo a partire da una mappa di uso del suolo (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2003) e dalla carta geo-litologica della Regione, utilizzando la tabella di

conversione gruppi idrologici – litologia fornita dal progetto Catchrisk (Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2005), opportunamente modificata tenendo conto delle conclusioni di Cucchi *et al.* (2000).

La metodologia tiene conto anche delle condizioni idrologiche del giorno precedente che influenzano il grado di saturazione del terreno (Kannan *et al.*, 2008) e quindi il ruscellamento superficiale.

Componente di infiltrazione

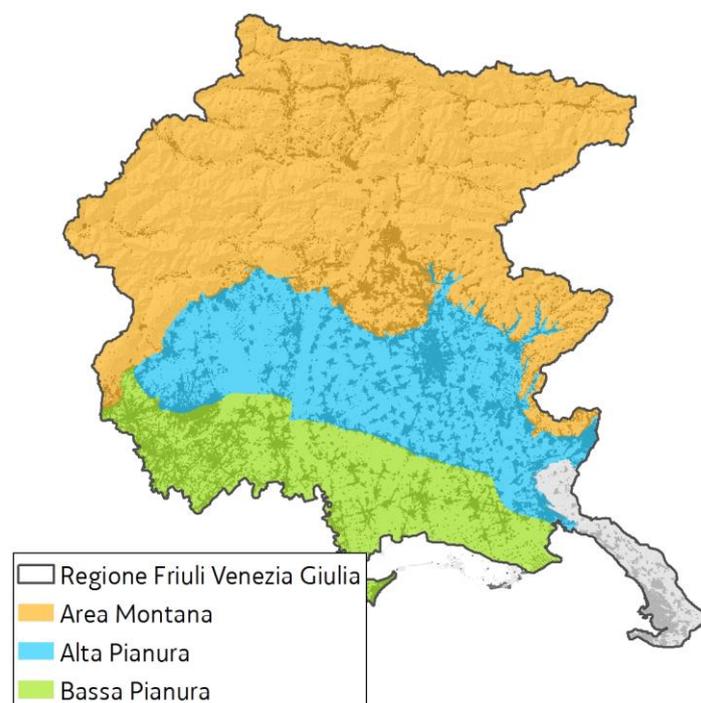
La componente di infiltrazione profonda (Inf) è stata calcolata come quota d'acqua eccedente rispetto all'AWC_{max}.

Componente di risalita di falda

La componente di risalita di falda (f) è stimata per ogni cella di calcolo sulla base dei dati forniti dal Servizio fitosanitario e chimico, ricerca, sperimentazione e assistenza tecnica di ERSA.

Il calcolo è stato effettuato nell'ipotesi di mantenere invariato l'uso del suolo e il panorama colturale sia nello scenario storico che negli scenari futuri.

Per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico, i risultati del modello sono stati aggregati, oltre che per l'intero territorio regionale, anche secondo i seguenti macroareali, individuati sulla base delle caratteristiche idrogeologiche del territorio regionale: area montana, Alta Pianura e Bassa Pianura (fig. 3.1.4).

fig. 3.1.4 – Macroareali nei quali è stato valutato l'impatto dei cambiamenti climatici.

La modellazione del ciclo idrologico effettuato ha reso disponibili le proiezioni future e lo scenario storico delle seguenti componenti: Precipitazione totale (P_{tot}), Precipitazione nevosa (P_{neve}), Precipitazione piovosa ($P_{pioggia}$), Afflusso al suolo (Aff), Temperatura media (T_{media}), Evapotraspirazione di riferimento (ET0), Evapotraspirazione reale (ET_r), Ruscellamento (R), Infiltrazione (Inf).

Il calcolo delle singole componenti del ciclo dell'acqua ha altresì permesso di quantificare:

- il numero di giorni in cui le coltivazioni subiscono uno stress idrico (Dstress) ovvero i giorni in cui l'AWC scende sotto a RFU;

- Il deficit evapotraspirativo (Deficit) ovvero il volume d'acqua mancante rispetto all'evapotraspirazione colturale. Questa informazione quantifica la carenza di acqua sofferta dalla vegetazione nei periodi di stress idrico.

Considerata la notevole mole di dati prodotti dalle numerose simulazioni effettuate, i risultati sono riportati in appendice come ensemble dei vari modelli climatologici in termini di valore medio mensile, suddivisi per componente e per zona di analisi; sono presentati attraverso grafici nei quali sono riportati, per i due periodi futuri (2021-2050 e 2071-2100), gli scenari RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, nonché il riferimento al periodo storico (1976-2005).

Impatti futuri

Il confronto tra i valori medi mensili che potrebbero verificarsi nei due periodi futuri con il dato storico, evidenzia cambiamenti particolarmente significativi nel periodo 2071 – 2100 in particolare per lo scenario 8.5.

La variazione della componente di temperatura media è stata ampiamente trattata nel paragrafo cap. 1.2; ai fini del presente caso studio vale la pena di ricordare soprattutto come si osservi per tutti e tre gli scenari e in tutti i macroareali un aumento generalizzato dei valori di temperatura media mensile (Appendice – fig. 3.1.17).

Per quanto riguarda la precipitazione totale si riscontra, in generale, un aumento del volume annuale piovuto, tuttavia è ben evidente la diminuzione delle precipitazioni nel periodo estivo (Appendice – fig. 3.1.13).

L'aumento generale della temperatura media, è particolarmente significativo nelle aree montane: secondo le proiezioni dei modelli climatologici, in montagna la temperatura media aumenta assestandosi costantemente su valori superiori allo zero (Appendice – fig. 3.1.17b). Di conseguenza, il predetto aumento di precipitazione nei mesi invernali non si traduce in un corrispondente aumento della precipitazione nevosa, che invece diminuisce in maniera sensibile soprattutto verso la fine del secolo, ma nell'aumento dell'afflusso al suolo (Appendice – fig. 3.1.16b). In particolare si osserva come il mese di gennaio potrebbe assestarsi su valori di afflusso al suolo prossimi a quelli dei mesi primaverili attuali. A tal proposito sono indicative le figure 3.1.5 e 3.1.6 che mostrano come potrebbe modificarsi la distribuzione della precipitazione nevosa nel periodo invernale sul territorio regionale nei due periodi futuri 2021-2050 e 2071-2100.

I cambiamenti nelle componenti precipitazione e temperatura si riflettono anche sulla componente ruscellamento dove si osserva in generale un aumento dei volumi per tutti gli scenari a cui fa da contrasto una diminuzione nei mesi estivi. Gli scenari relativi al periodo 2071-2100 enfatizzano l'andamento non omogeneo durante l'anno della variazione: nei mesi invernali si assiste ad un aumento particolarmente significativo del volume di ruscellamento, che nello scenario RCP 8.5 arriva a circa il 110%, cui si contrappone, nel medesimo scenario, una riduzione media di circa il 30% nel periodo estivo (fig. 3.1.7). Pertanto è plausibile aspettarsi una minore portata dei corsi d'acqua in estate che, in combinazione con il possibile aumento delle temperature anche di 5°C nel periodo estivo e in area montana, potrebbe causare una possibile sofferenza degli habitat legati all'acqua, ma anche una conseguente minor disponibilità di risorsa idrica per la produzione di energia idroelettrica e per l'agricoltura.

fig. 3.1.5 – Distribuzione nei mesi invernali della componente precipitazione nevosa suddivisa per periodi e scenari: storico (a), 2021-2050 RCP 2.6 (b), 2021-2050 RCP 4.5 (c) e 2021-2050 RCP 2.5 (d).

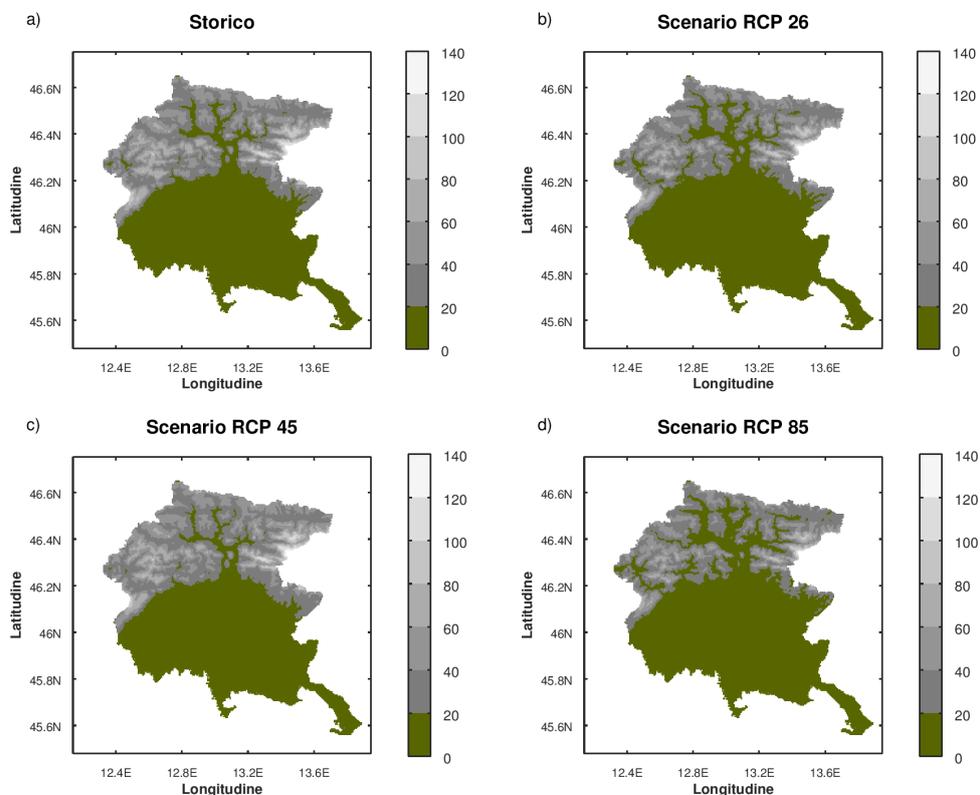



fig. 3.1.6 – Distribuzione nei mesi invernali della componente precipitazione nevosa suddivisa per periodi e scenari: storico (a), 2071-2100 RCP 2.6 (b), 2071-2100 RCP 4.5 (c) e 2071-2100 RCP 2.5 (d).

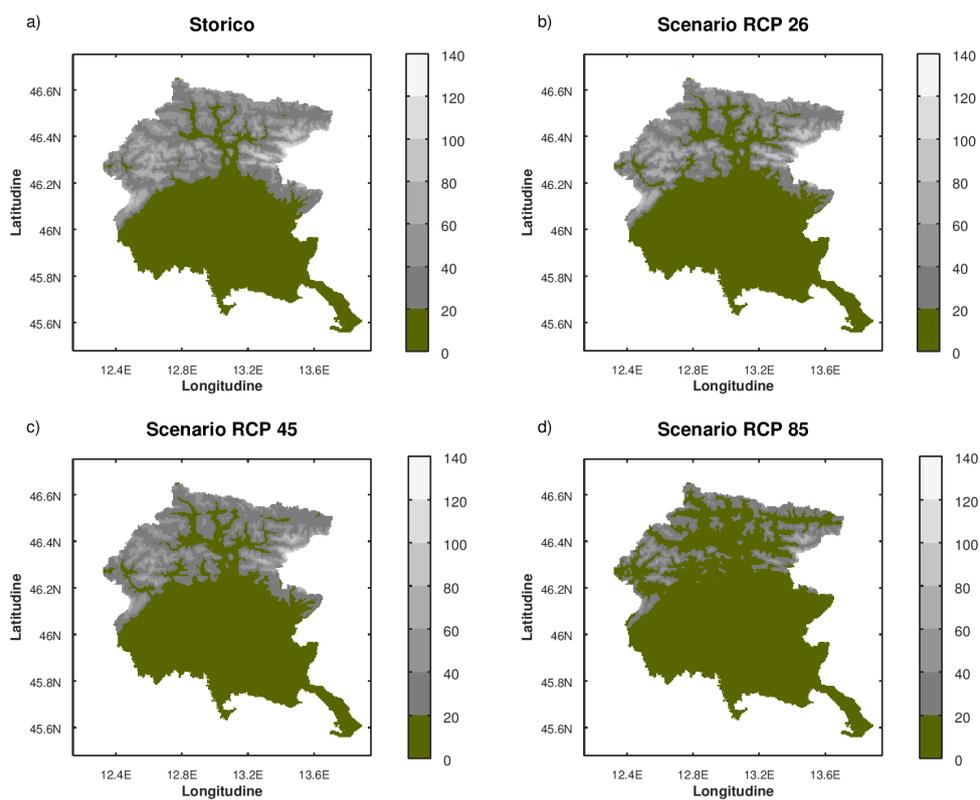
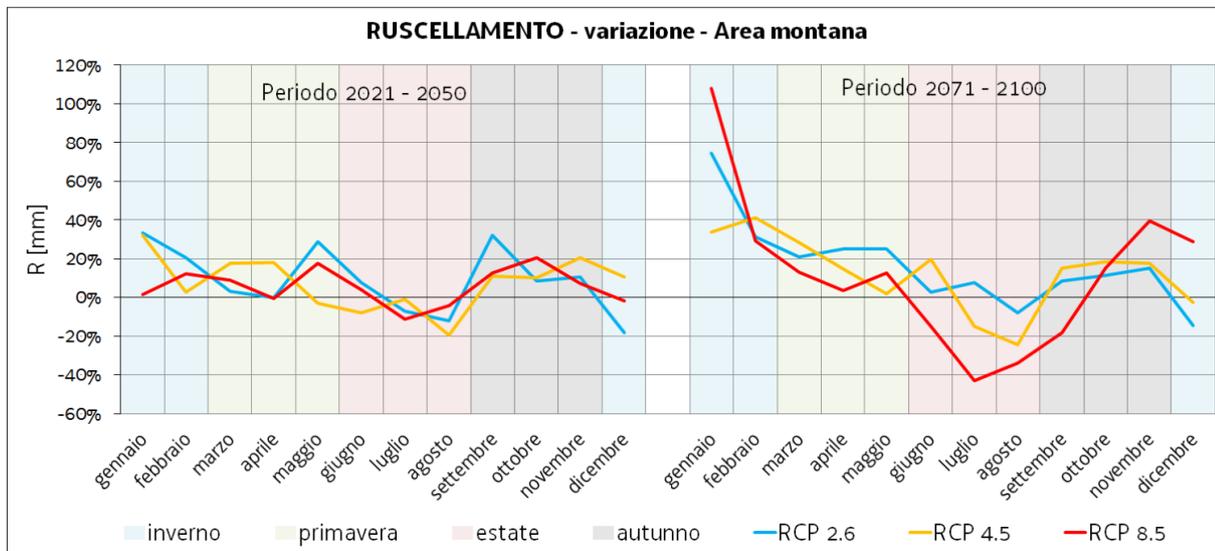



fig. 3.1.7 – Variazione della componente ruscellamento nell'area montana rispetto al dato storico.

Dal punto di vista della disponibilità di acque sotterranee, la falda freatica dell'Alta Pianura friulana ha un ruolo chiave sia come riserva di acqua sia come "regolatore" della pressione delle falde artesiane della Bassa Pianura.

La ricarica di questo complesso idrogeologico è costituita dalla componente infiltrazione e dalla portata dispersa dai corsi d'acqua allo sbocco in pianura. Per quanto riguarda la componente infiltrazione, in Alta Pianura, si osserva un aumento del volume annuo infiltrato nello scenario RCP 2.6 e una lieve diminuzione del volume annuo infiltrato nello scenario RCP 8.5. Anche in questo caso si riscontra una differente distribuzione durante l'anno rispetto allo storico (fig. 3.1.8) In particolare risulta particolarmente evidente il possibile calo nel periodo estivo per lo scenario RCP 8.5.

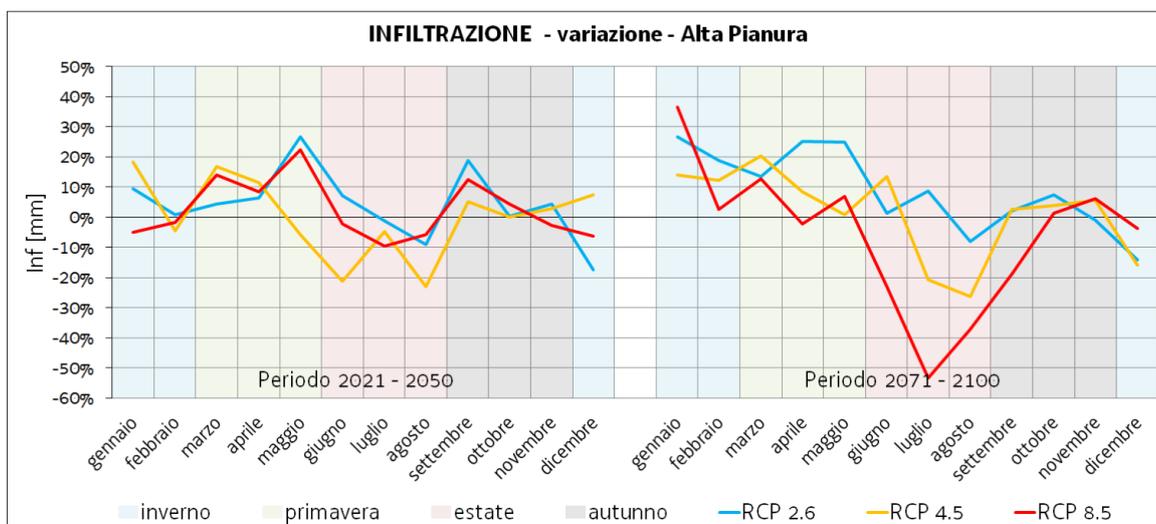
fig. 3.1.8 – Variazione della componente infiltrazione in Alta Pianura rispetto al dato storico.

Per quanto riguarda le dispersioni dai corsi d'acqua alcune valutazioni possono essere fatte analizzando la somma delle componenti ruscellamento e infiltrazione dell'area montana che rappresentano il deflusso idrico globale ovvero la massima potenzialità espressa in termini di volume disponibile (fig. 3.1.9). L'esame conferma un andamento analogo a quanto osservato per la componente infiltrazione in Alta Pianura sia a scala annuale che a scala stagionale.

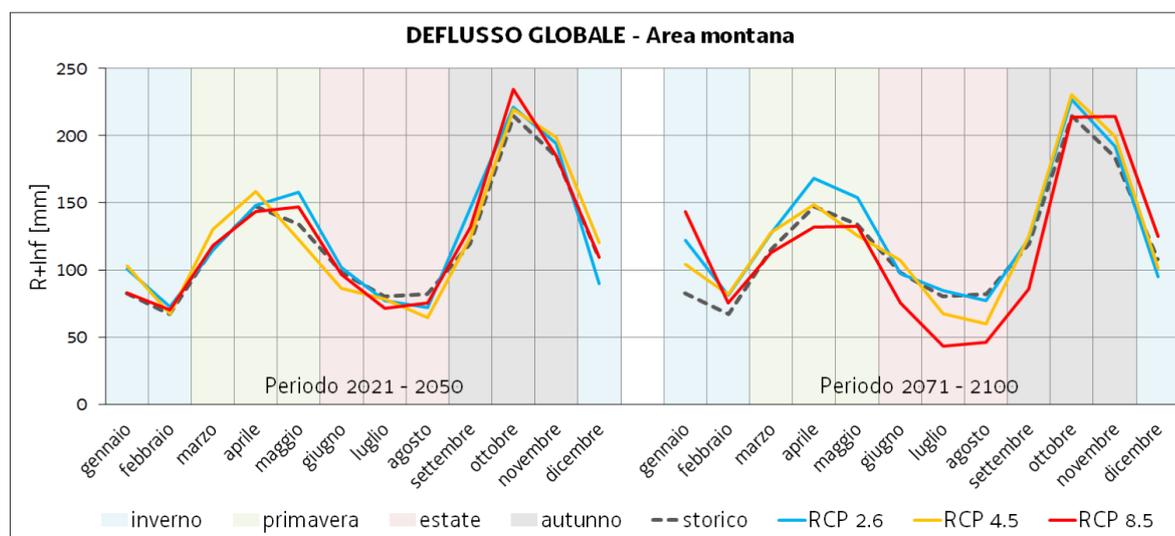
fig. 3.1.9 – Valore medio mensile della componente deflusso globale nell'area montana.

I cambiamenti osservati nelle diverse componenti del ciclo dell'acqua hanno come diretta conseguenza un aumento dei giorni in cui le coltivazioni subiscono uno stress idrico (fig. 3.1.10) e un aumento del deficit evapotraspirativo in particolare nei mesi estivi (fig. 3.1.11 e fig. 3.1.12). Complessivamente, in pianura, nello scenario RCP 8.5 il periodo di stress idrico delle colture potrebbe aumentare anche di 5/6 giorni nel periodo 2071-2100 con la conseguente necessità di aumentare la frequenza dell'irrigazione. La diminuita disponibilità di acqua per la vegetazione non riguarda però la sola agricoltura, ma coinvolge anche parte del territorio montano e dunque il patrimonio boschivo (fig. 3.1.21 b e fig. 3.1.22 b).

fig. 3.1.10 – Variazione della componente giorni di stress idrico rispetto al dato storico in Alta Pianura (a) e in Bassa Pianura (b).

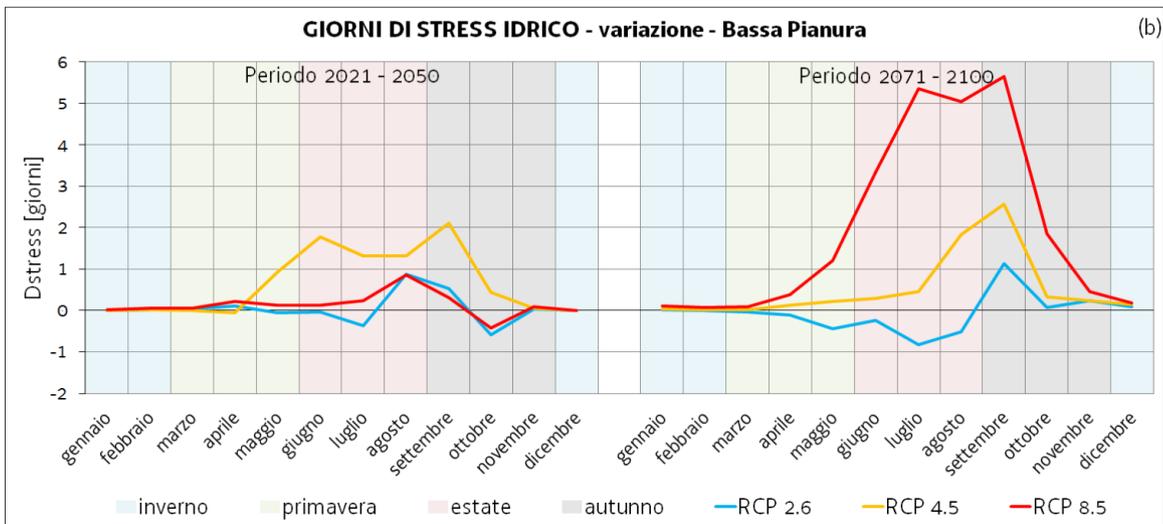
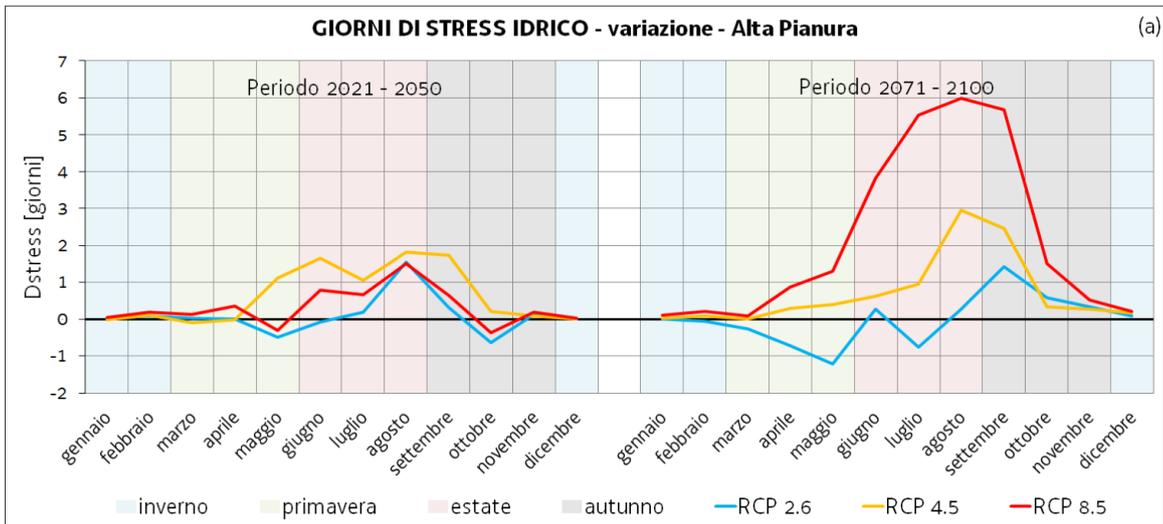



fig. 3.1.11 – Distribuzione nei mesi estivi della componente deficit evapotraspirativo suddivisa per periodi e scenari: storico (a), 2021-2050 RCP 2.6 (b), 2021-2050 RCP 4.5 (c) e 2021-2050 RCP 2.5 (d).

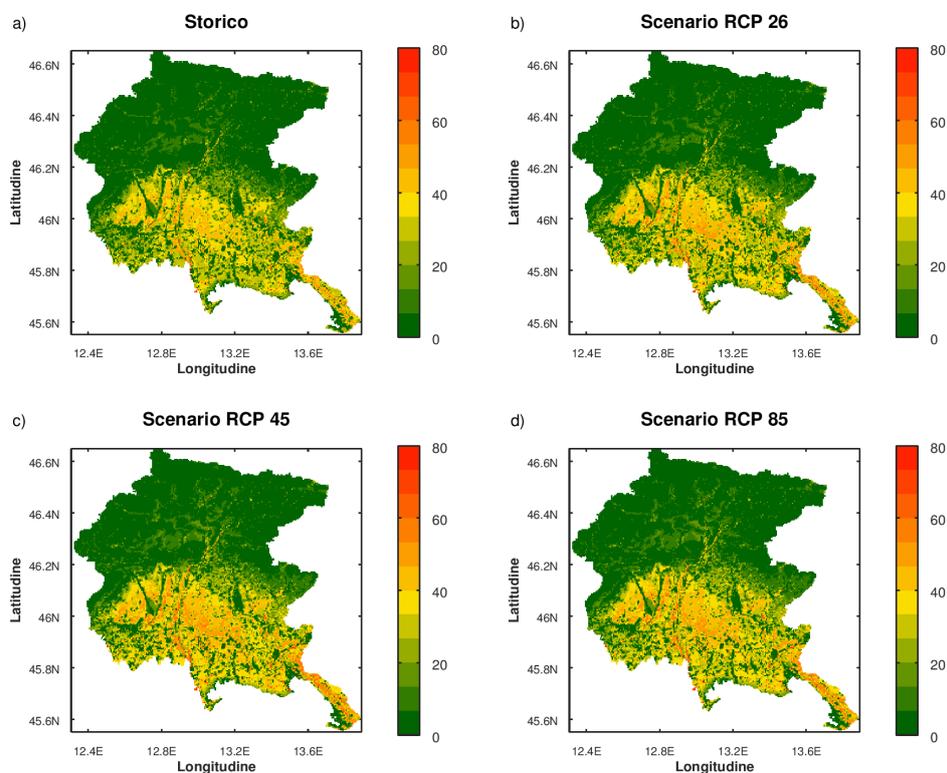
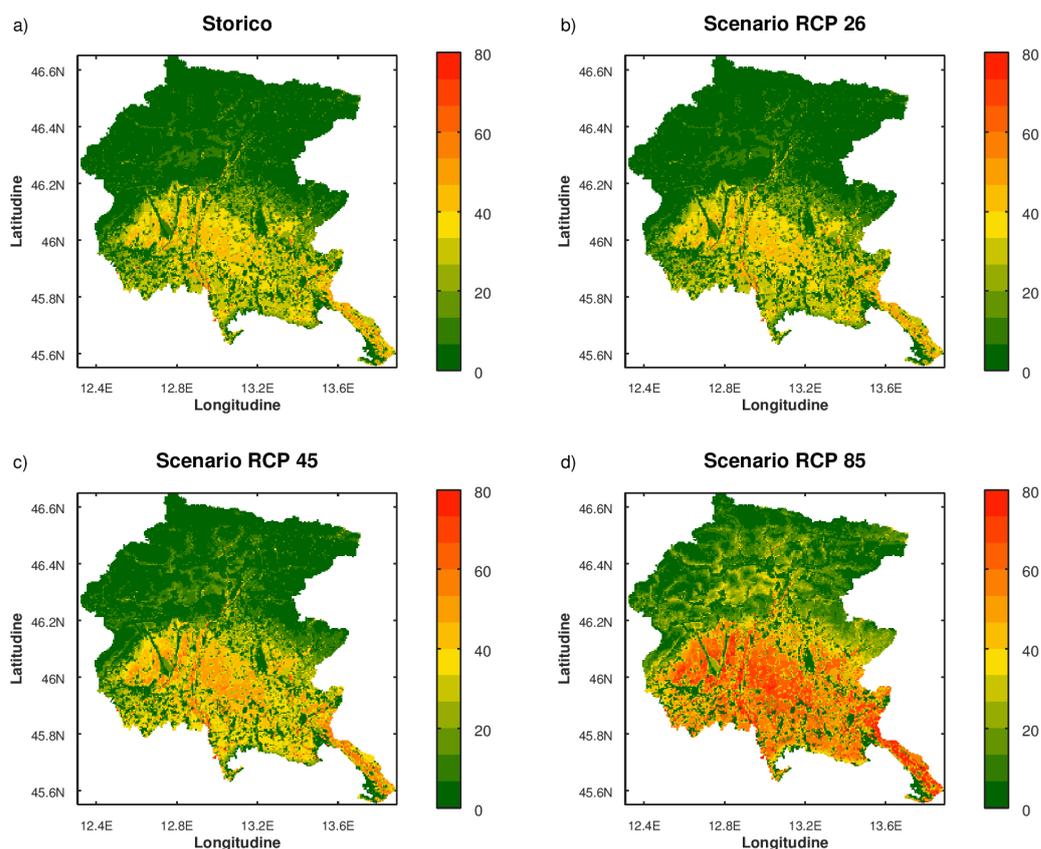



Fig. 3.1.12 – Distribuzione nei mesi estivi della componente deficit evapotraspirativo suddivisa per periodi e scenari: storico (a), 2071-2100 RCP 2.6 (b), 2071-2100 RCP 4.5 (c) e 2071-2100 RCP 2.5 (d).

Considerazioni conclusive

Dai risultati della modellazione emerge come l'impatto dei cambiamenti climatici sulla disponibilità di risorsa idrica potrebbe portare ad un aumento complessivo, in termini di volume medio annuo, del quantitativo d'acqua affluito al suolo; tale aumento, tuttavia, risulta maggiore per lo scenario 2.6 e molto piccolo per lo scenario 8.5. È inoltre particolarmente significativo l'andamento non omogeneo durante l'anno della variazione: nei mesi invernali si assiste ad un aumento della risorsa disponibile, cui si contrappone nei mesi estivi un significativo calo, particolarmente evidente per lo scenario 8.5. Tale andamento risulta accentuato negli scenari relativi al periodo 2071-2100. Si osserva inoltre una riduzione delle precipitazioni di tipo nevoso, a causa dell'aumento di temperatura, ed un conseguente aumento di quelle di tipo piovoso.

Evidente anche l'effetto dell'aumento della temperatura media sulla vegetazione: si osserva infatti una maggiore esigenza evapotraspirativa con un aumento dei giorni in cui le coltivazioni subiscono uno stress idrico che è necessario compensare con una maggiore irrigazione. La maggiore necessità di irrigazione combinata a un'inferiore disponibilità di risorsa idrica per i corsi d'acqua, nel periodo estivo, potrebbe rendere difficoltoso l'approvvigionamento per l'agricoltura, in particolare nell'Alta Pianura in sinistra Tagliamento, dove il quantitativo di acqua disponibile per l'irrigazione dipende direttamente dalla portata del Fiume Tagliamento.

Quanto osservato si riflette anche sul meccanismo di ricarica della falda freatica dell'Alta Pianura che è modificato in particolare nello scenario 8.5, dove si assiste ad una diminuzione della ricarica complessiva annua unita a un marcato calo nel periodo estivo. Pertanto, considerate le criticità già emerse allo stato attuale (Zini et al., 2011) risulta auspicabile un miglioramento nella gestione dalla risorsa idrica puntando innanzitutto ad annullare il divario tra la portata effettivamente prelevata e il reale fabbisogno.

Appendice

Seguono le ulteriori figure del caso studio.

fig. 3.1.13 – Valore medio mensile della componente Precipitazione totale in FVG (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d)

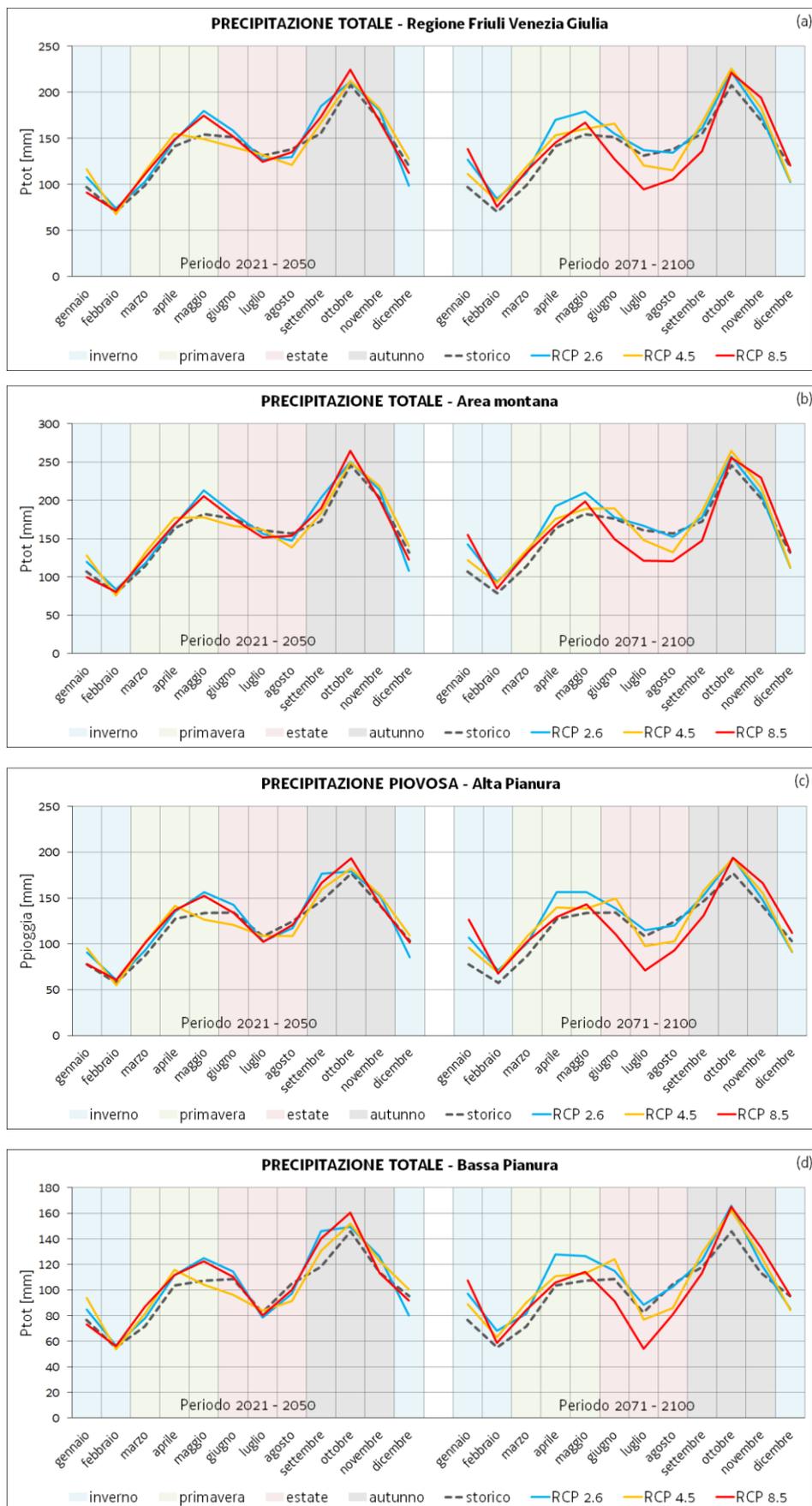



fig. 3.1.14 – Valore medio mensile della componente Precipitazione nevosa nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

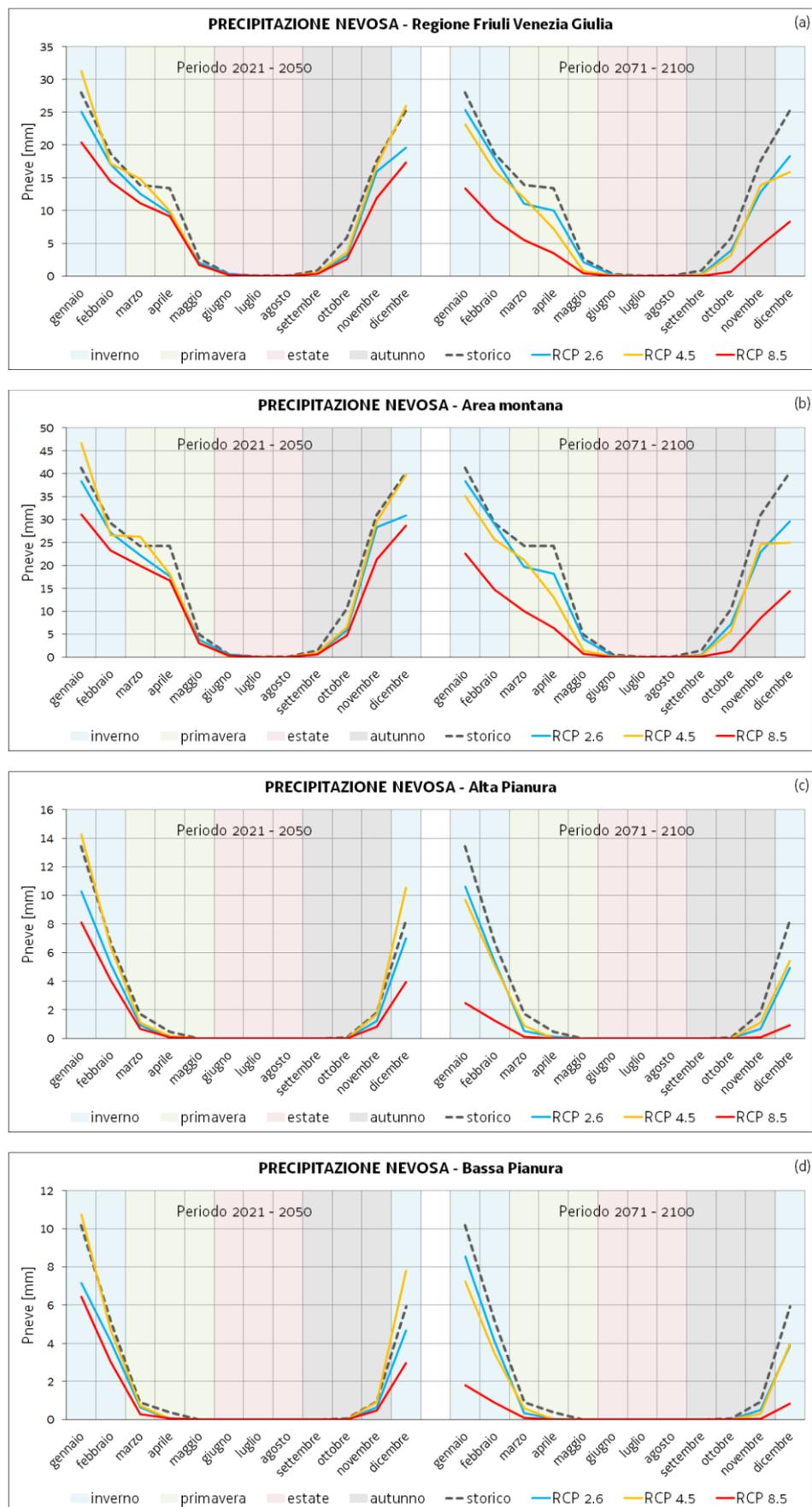



fig. 3.1.15 – Valore medio mensile della componente Precipitazione piovosa nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

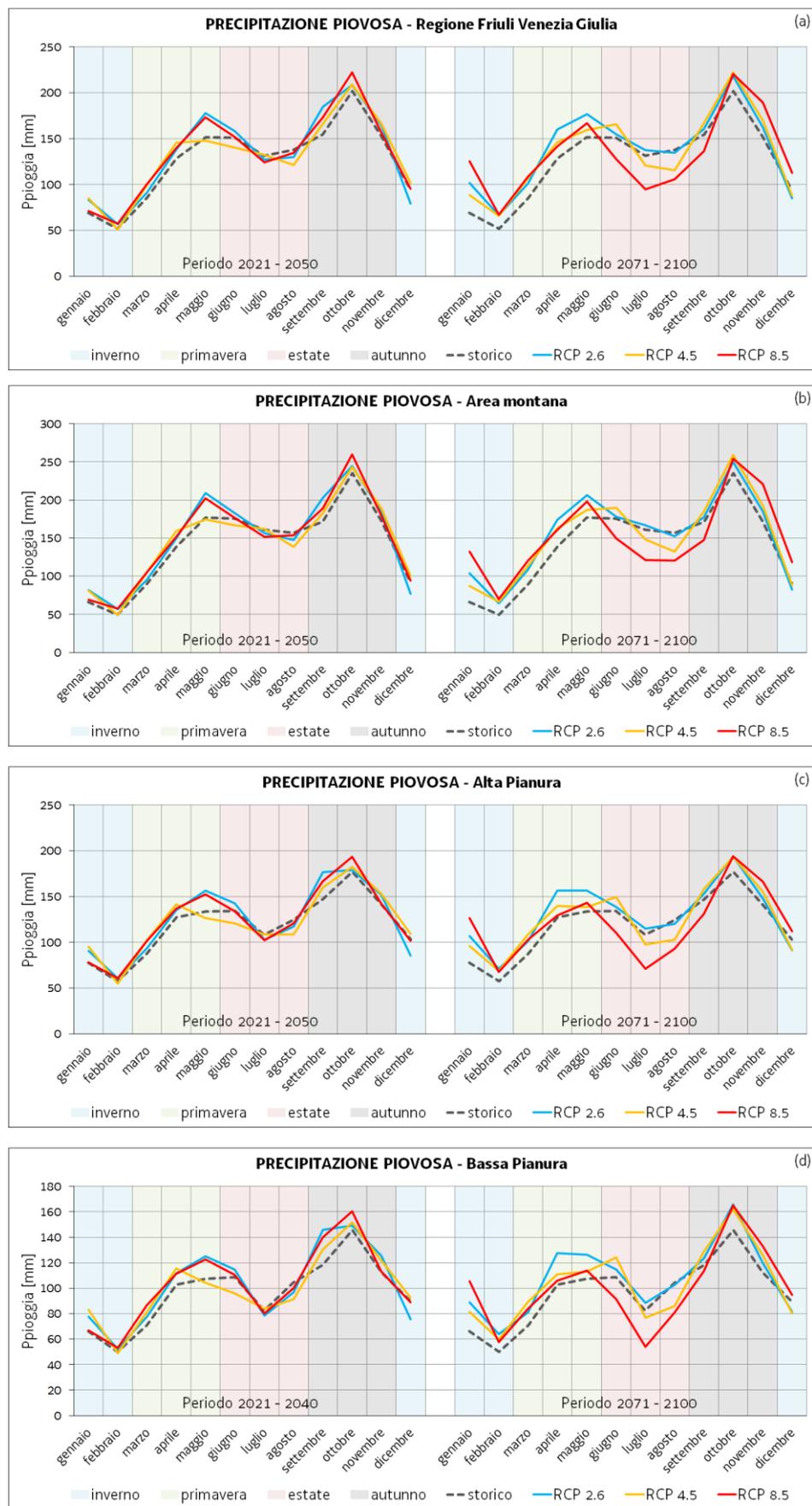



fig. 3.1.16 – Valore medio mensile della componente Afflusso al suolo nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

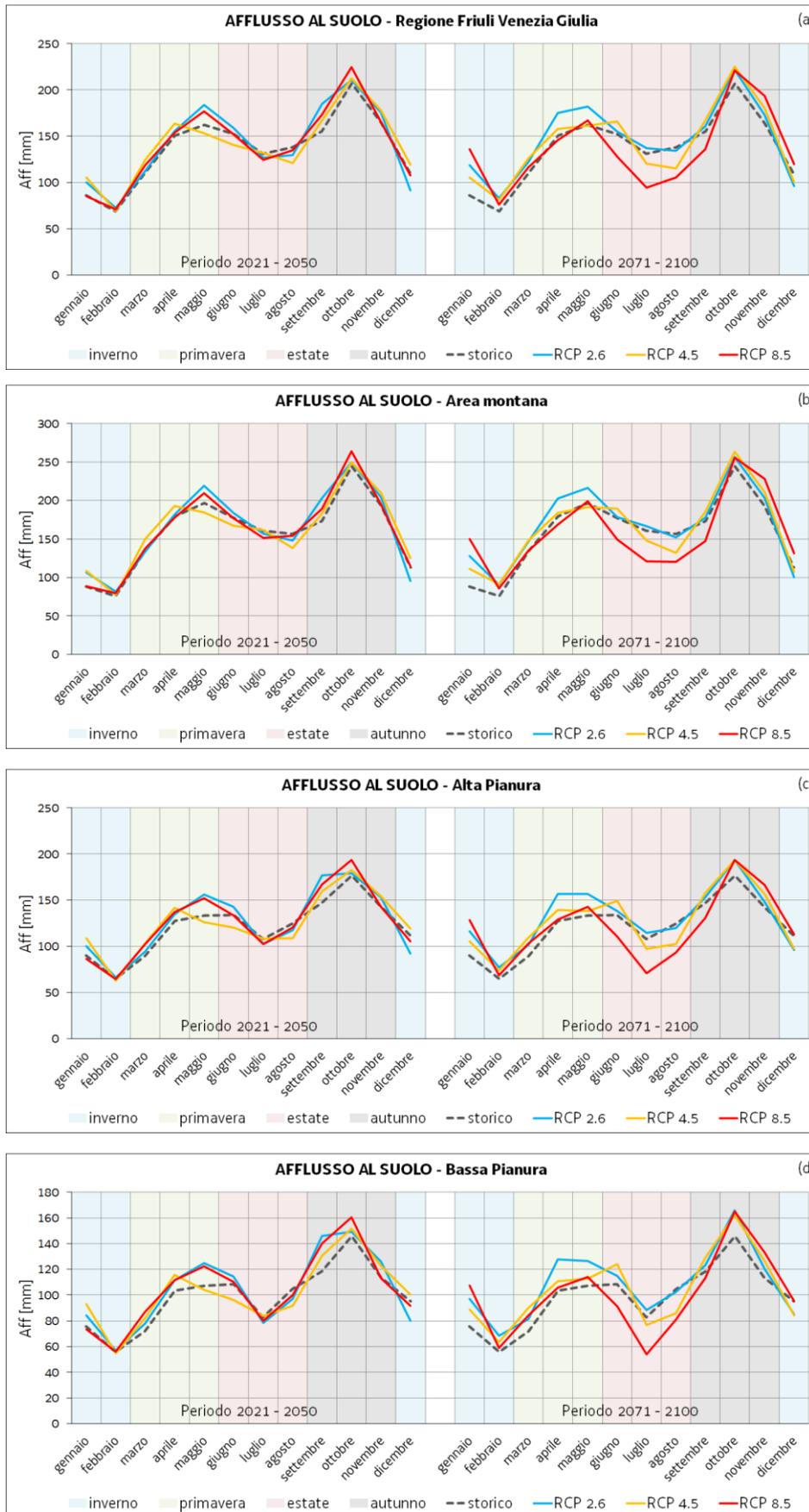



fig. 3.1.17 – Valore medio mensile della componente Temperatura media nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

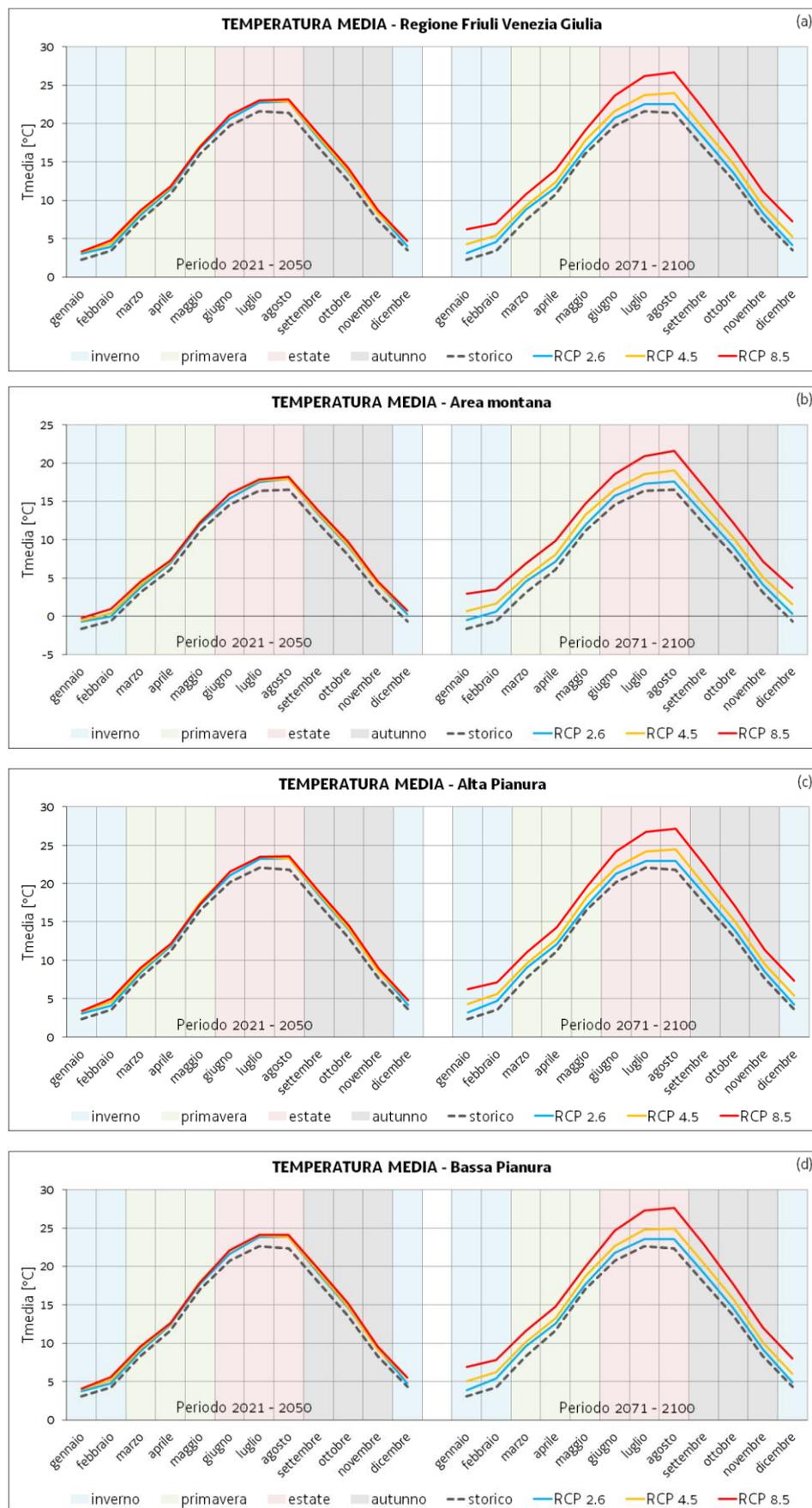



fig. 3.1.18 – Valore medio mensile della componente Evapotraspirazione di riferimento nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

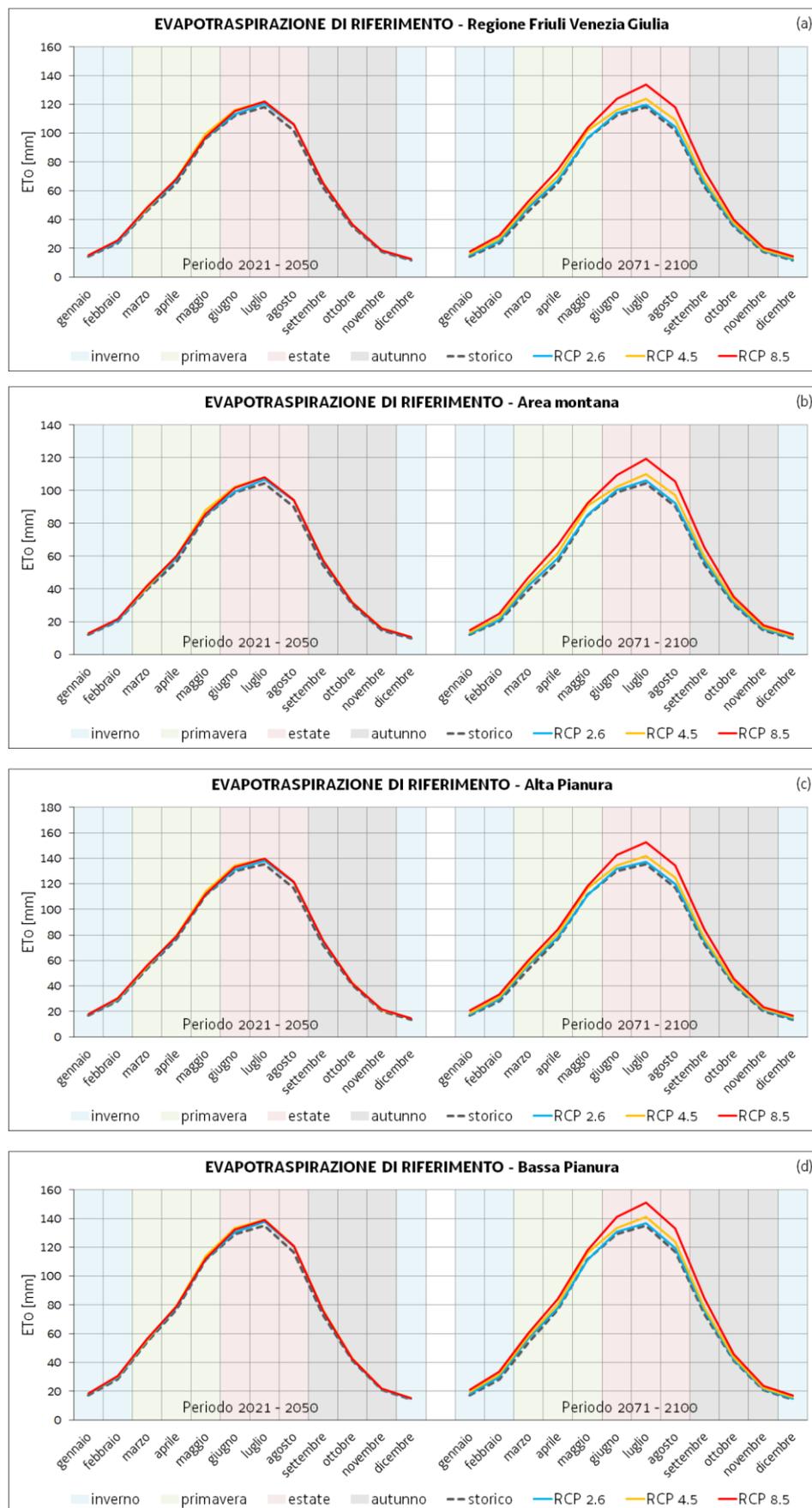



fig. 3.1.19 – Valore medio mensile della componente Evapotraspirazione reale nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

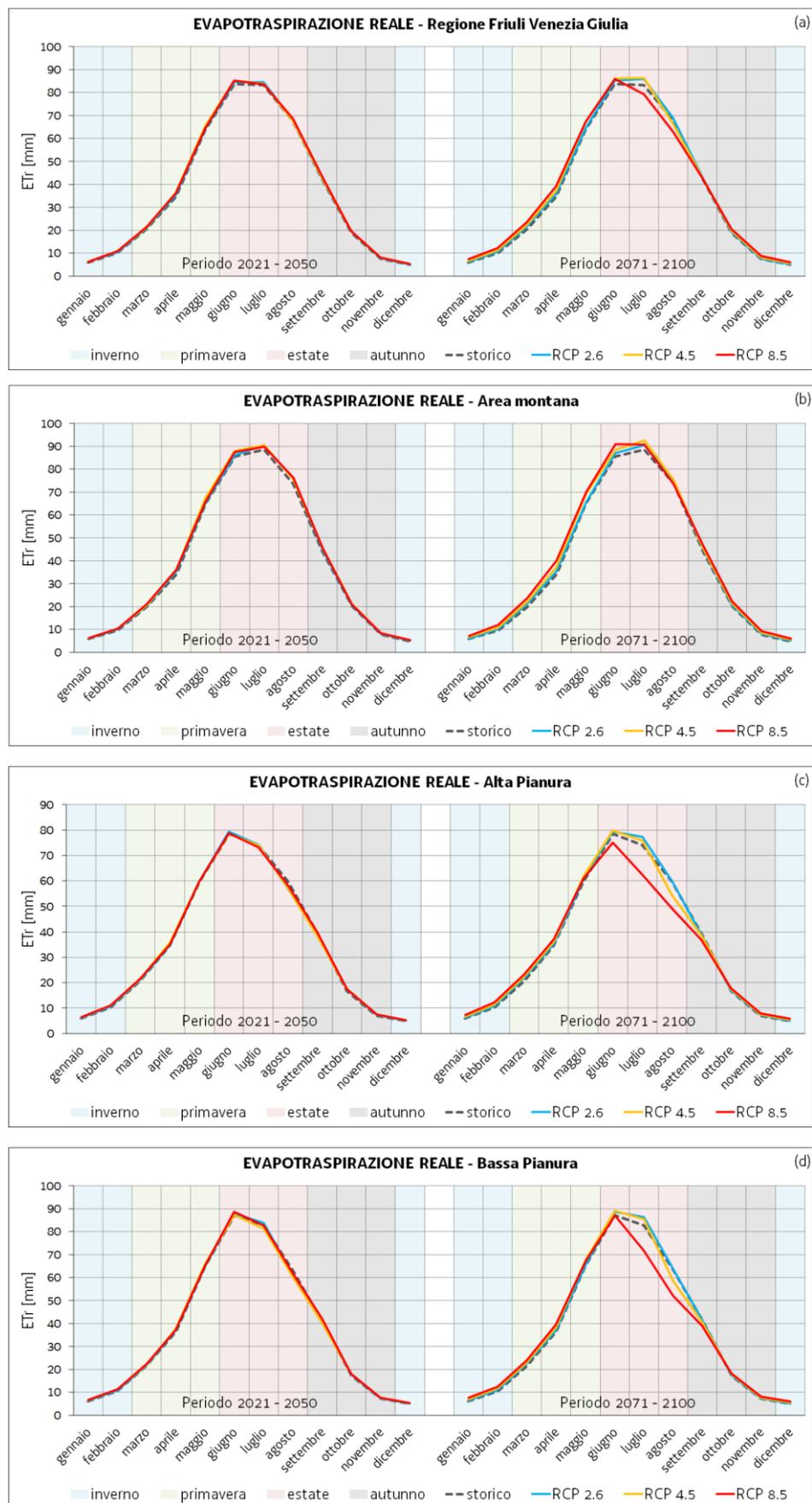



fig. 3.1.20 – Valore medio mensile della componente Ruscellamento nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

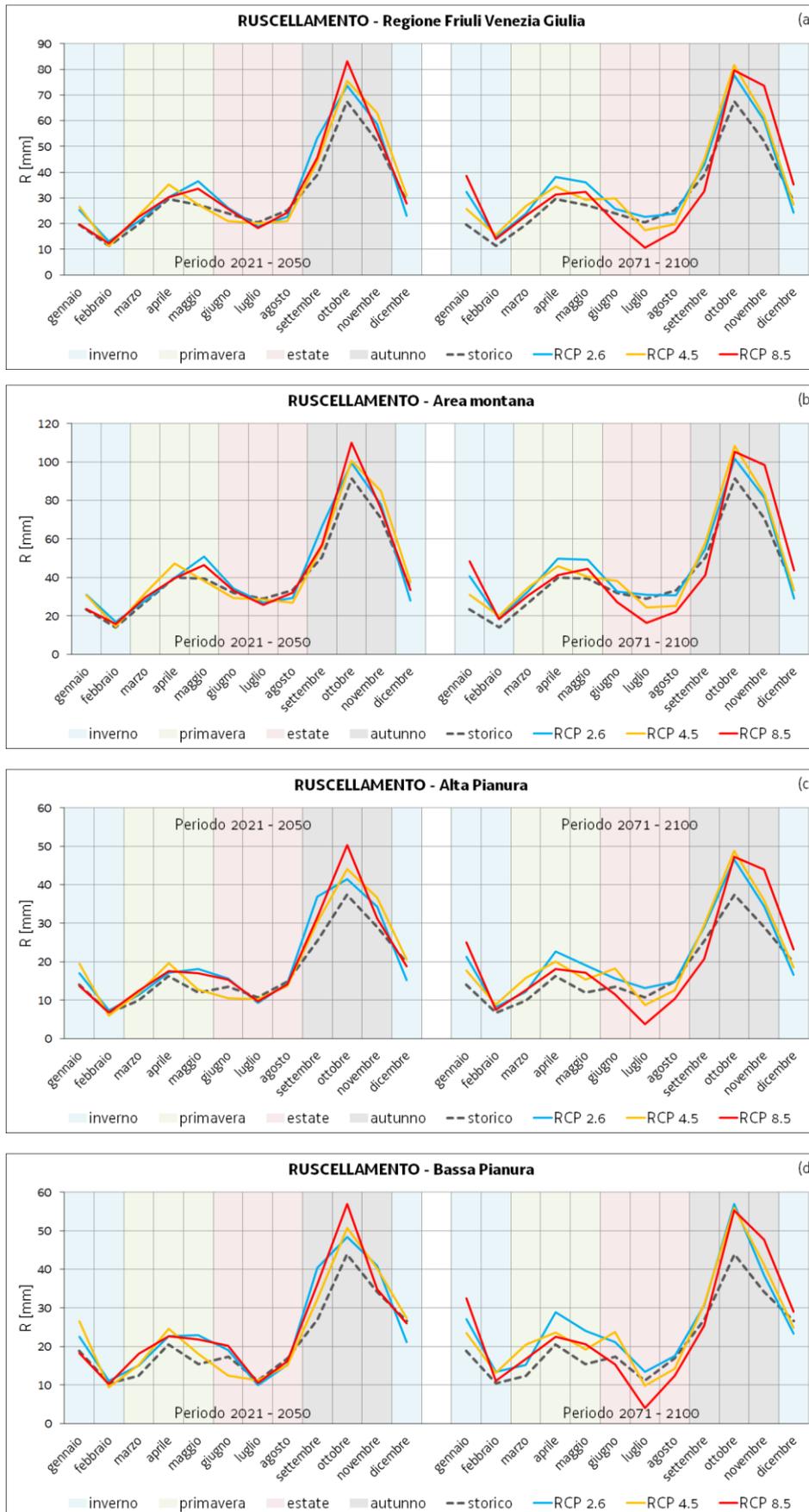



fig. 3.1.21 – Valore medio mensile della componente Infiltrazione nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

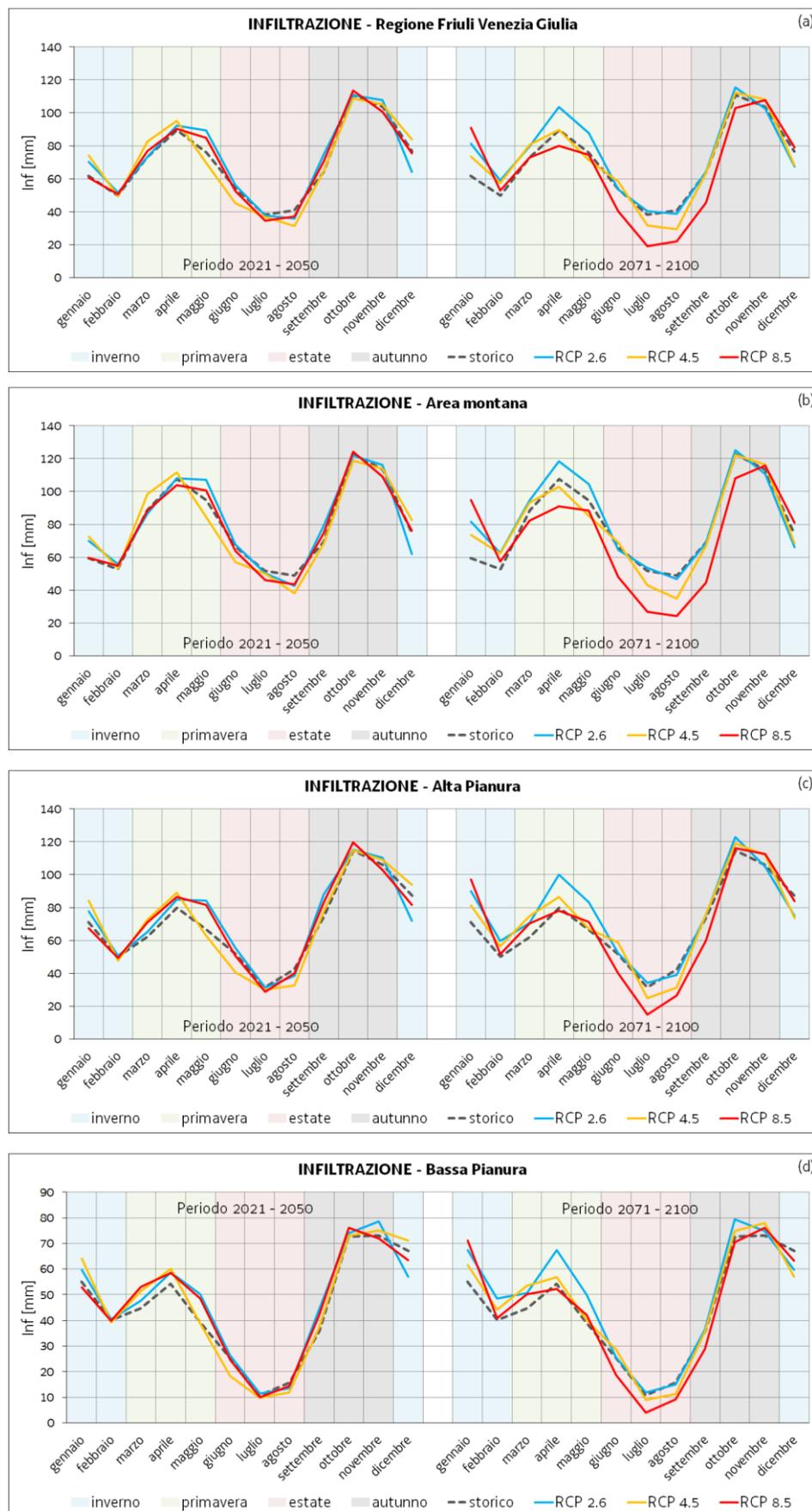



fig. 3.1.22 – Numero di giorni medio mensile in cui le coltivazioni subiscono uno stress idrico nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

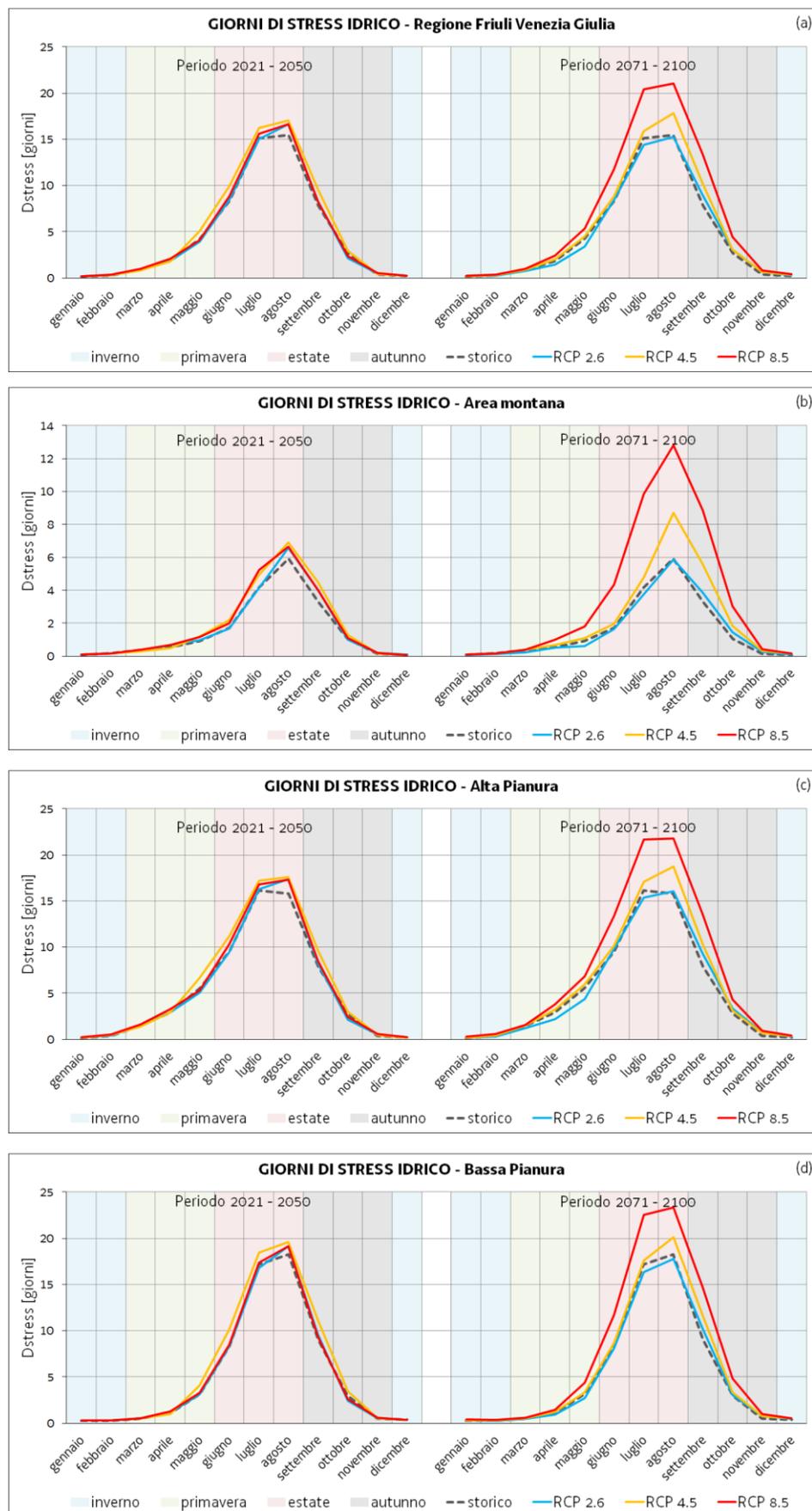
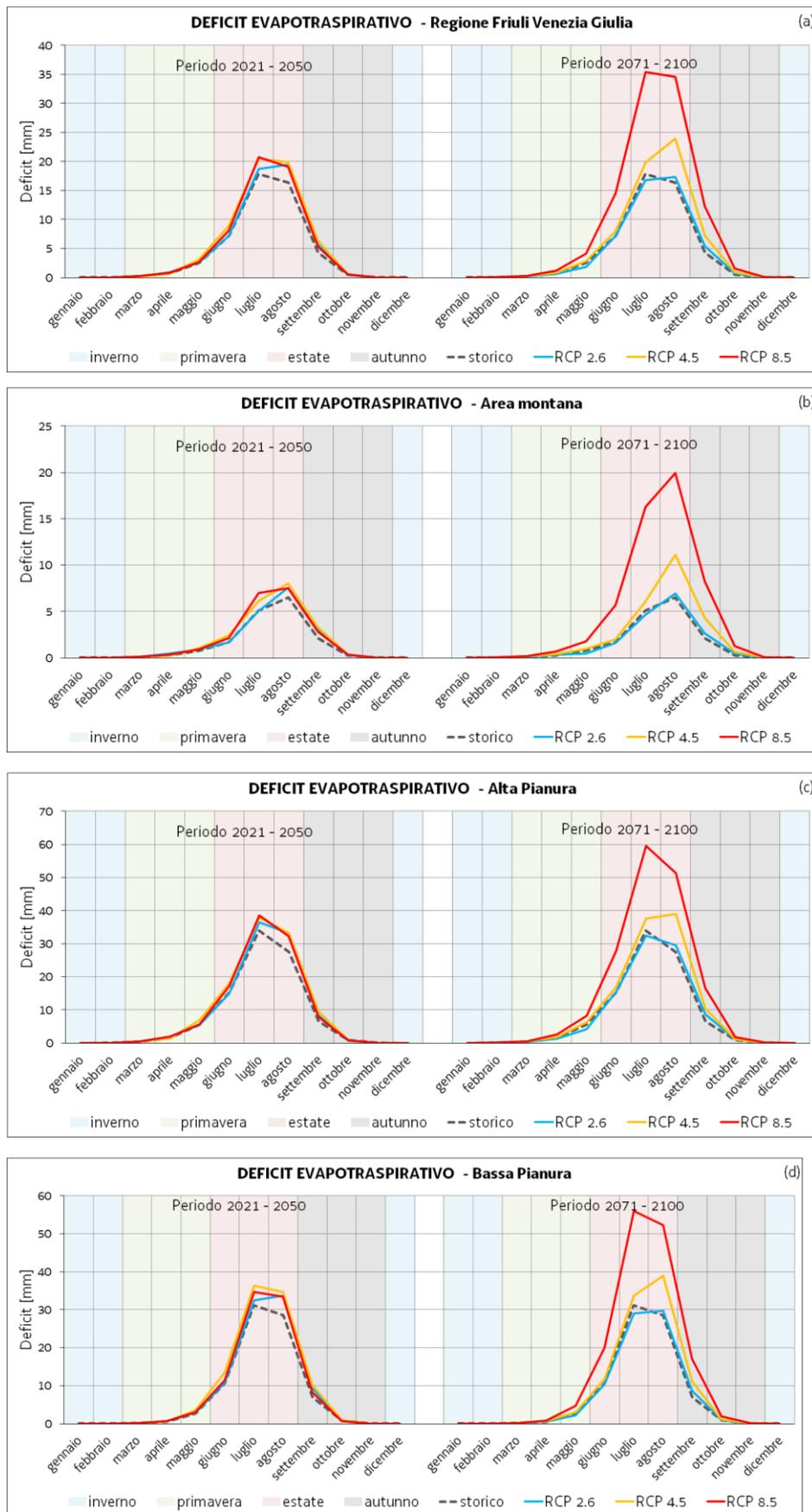



fig. 3.1.23 – Valore medio mensile della componente deficit evapotraspirativo nella Regione Friuli Venezia Giulia (a), nell'area montana (b), in Alta Pianura (c) e in Bassa Pianura (d).

3.2. Dissesto idrogeologico: la frequenza degli eventi di acqua alta

Fabio Raicich -CNR- ISMAR U.O.S. di Trieste

Sintesi

Sono studiate le variazioni della frequenza degli eventi di acqua alta nel XXI secolo rispetto alla fine del XX secolo. Sono stati considerati gli effetti della pressione e del vento, secondo le proiezioni di cinque modelli climatici, e della variazione del livello medio marino in tre scenari futuri. Il maggiore impatto viene dell'aumento del livello medio con un significativo aumento della frequenza già a metà secolo, mentre l'impatto del forzante atmosferico non appare cambiare sensibilmente.

Mareggiata a Barcola (Trieste), ottobre 2003

Stato delle conoscenze

Tra le conseguenze del cambiamento climatico si osserva l'aumento del livello marino su scala globale. Tra i fattori più importanti che concorrono al fenomeno, due sono direttamente legati all'aumento della temperatura atmosferica. Si tratta dell'aumento del volume dell'Oceano, prodotto dal suo riscaldamento, e l'aumento della massa oceanica conseguente alla fusione dei ghiacci continentali.

È opportuno distinguere tra il livello marino relativo e quello geocentrico. Il livello relativo rappresenta la distanza tra la superficie del mare e un riferimento locale collegato al suolo, p.es. un caposaldo geodetico; come conseguenza, il livello relativo è influenzato dai movimenti verticali del suolo. Il livello geocentrico è la distanza tra la superficie del mare e un altimetro satellitare in orbita intorno alla Terra; in questo caso il riferimento è globale e corrisponde al geoide, che viene approssimato dall'ellissoide di riferimento.

Poiché i dati altimetrici sono disponibili solo dal 1992, le stime di velocità di aumento del livello globale su scala secolare fanno normalmente uso di misure di livello relativo in località considerate stabili rispetto a movimenti verticali del suolo. Il livello medio globale è aumentato alla velocità media di circa 1.7±0.2 mm/a nel XX secolo e di 3.2±0.4 mm/a nel periodo coperto dall'altimetria (Church et al., 2013).

Dalla fine del XIX secolo, quando sono iniziate osservazioni regolari, il livello medio marino lungo la costa del Friuli Venezia Giulia (dati di Trieste), che dipende da quello Mediterraneo, ha seguito l'andamento globale fino ai primi anni '60. Quindi, fino al 1990 circa, il livello del Mediterraneo è rimasto praticamente stazionario (p.es Marcos e Tsimplis, 2008) per poi manifestare un aumento alla velocità di circa 4.4 mm/a, oltre un terzo maggiore di quella globale. La stima del trend secolare, pari a 1.3±0.2 mm/a (Zerbini et al., 2017), è inferiore a quella globale, ma, per quanto detto, non generalizzabile al di fuori del Mediterraneo.

Tra gli effetti di un livello medio più alto si hanno maggiori rischi di inondazione costiera, maggiore erosione, più difficile scarico fluviale in mare, innalzamento della tavola d'acqua e intrusione del cuneo salino nel sottosuolo.

Un capitolo a parte, di grande interesse per la costa del Friuli Venezia Giulia, è rappresentato dagli eventi di *storm surge*. Essi sono noti anche come acque alte e sono causati da opportune condizioni meteorologiche su scala sinottica, ossia relativa bassa pressione atmosferica e intenso vento meridionale, tipici dell'autunno e dell'inverno. Questi eventi estremi hanno notevole impatto sulla costa regionale sotto forma di allagamenti e di erosione, anche a causa del forte moto ondoso che spesso li accompagna.

Esiste una notevole variabilità nella loro frequenza sia su base interannuale sia interdecadale. Considerando l'andamento di lungo periodo (multidecadale) e basandosi sui dati di livello relativo, in media si osserva un significativo aumento del numero di eventi durante tutto il secolo scorso, coerentemente con l'aumento del livello medio. Tuttavia, se si considera il solo contributo meteorologico, il numero degli eventi non presenta una chiara tendenza, indicando che le condizioni meteorologiche favorevoli agli eventi non presentano significative variazioni in termini di intensità e/o durata.

Un altro aspetto importante è la subsidenza, ossia il lento abbassamento del suolo, di origine naturale o antropica, causato dalla compattazione dei sedimenti. Le informazioni disponibili si avvalgono di campagne di livellazione ripetute e, più recentemente, del GPS continuo. Livellazioni di precisione nell'area lagunare, più sensibile al fenomeno per il tipo di terreni presenti, evidenziano velocità medie di subsidenza fino a 5 mm/a.

La Regione Friuli Venezia Giulia è caratterizzata da 54 km di coste basse sabbiose, che danno direttamente sull'Adriatico settentrionale, e da un bacino lagunare di 160 km^2. A monte della laguna 123 km^2 di terreni risultano situati al di sotto dello Zero IGM1942, poiché si tratta di terreni bonificati negli anni '30 del secolo scorso. Assume

quindi notevole importanza l'innalzamento del livello del mare e l'impatto che può avere su questa parte del territorio regionale e sulla zona costiera in generale. Nel valutare l'impatto delle variazioni di livello marino terremo conto: a) dell'aumento del livello medio (geocentrico), che, rispetto alla media 1986-2005, le proiezioni per il XXI secolo indicano intorno a 20-40 cm a metà secolo e 30-80 cm a fine secolo, in funzione di diversi scenari; b) delle variazioni della frequenza e intensità degli *storm surges*, dipendenti dalle condizioni meteorologiche su scala sinottica, sempre in diversi scenari; c) degli eventuali movimenti verticali del suolo.

Evidenze attuali

Oltre 140 anni di osservazioni consentono di descrivere l'evoluzione del livello marino relativo, ossia misurato rispetto a capisaldi costieri, lungo la costa del nord Adriatico. Tranne che per l'effetto della subsidenza locale, i dati di Trieste rappresentano bene l'andamento del livello lungo l'intera costa del Friuli Venezia Giulia. Si è osservato un aumento del livello alla velocità media di 1.3 mm/a, poco inferiore ai 1.7 mm/a riportati per il livello globale. Ciò si spiega in parte poiché, diversamente dall'Oceano, dalla metà degli anni '60 all'inizio degli anni '90 il livello del Mediterraneo è stato quasi stazionario, salvo poi aumentare rapidamente a circa 4.4 mm/a.

La bassa costa del nord Adriatico è sensibile agli *storm surges*, cioè gli innalzamenti di livello noti comunemente come acque alte, causati da condizioni cicloniche sul Mediterraneo centro-occidentale e vento di Scirocco sull'Adriatico. La loro frequenza e intensità variano su base interannuale e interdecadale. Dai dati di livello relativo, nel XX secolo la frequenza degli eventi è aumentata, coerentemente con l'andamento del livello medio. Invece, studiando la componente meteorologica, svincolata dal livello medio e dai movimenti verticali del suolo, non si riscontrano significative variazioni di lungo periodo, indicando cambiamenti trascurabili della frequenza e intensità delle condizioni meteorologiche favorevoli, ossia bassa pressione atmosferica e vento meridionale.

Metodologia

Introduzione

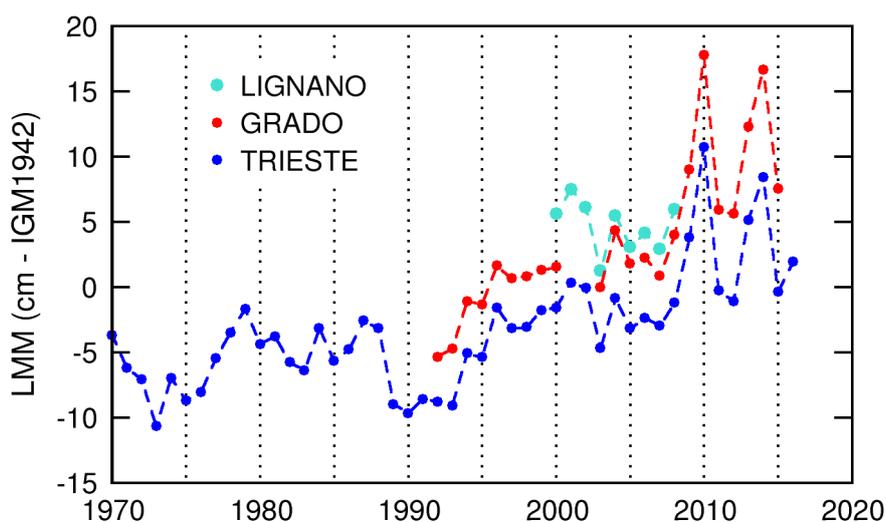
In un sito costiero il livello marino è generalmente osservato per mezzo di strumenti di varia tecnologia detti mareografi. Esso è la sovrapposizione di più componenti, le più importanti delle quali sono: la marea astronomica, la cui semiampiezza, nel nord Adriatico, raggiunge i 60-70 cm e i cui periodi principali sono di 12 e 24 ore; il livello residuo o marea meteorologica, che è l'effetto dell'azione della pressione atmosferica e del vento; le sesse, cioè oscillazioni libere, che rappresentano il ritorno all'equilibrio della superficie dopo aver subito una perturbazione, e che sono caratterizzate da periodi che vanno da alcuni minuti, come le sesse del Golfo di Trieste (Caloi, 1938) fino a 22 ore per la sessa fondamentale dell'Adriatico (p.es. Raicich et al., 1999); un ciclo stagionale, che è in parte legato ai tipici regimi di pressione atmosferica, quali bassa pressione in primavera e autunno e alta in inverno, e in parte alle variazioni di temperatura e salinità, quindi di densità, dipendenti dalla circolazione marina dell'Adriatico. A queste vanno aggiunte le variazioni di livello interannuali, decadali e a più lunga scala temporale legate alle fluttuazioni del clima a scala continentale nonché ai cambiamenti globali, che si esprimono, fra l'altro, in variazioni di volume e di massa dell'Oceano. Siccome il mareografo è solidale con la crosta terrestre, l'osservazione risente dei movimenti verticali del suolo. Inoltre, per costruzione, lo strumento non registra il moto ondoso indotto dal vento.

Il presente studio ha lo scopo di individuare possibili evoluzioni future dell'impatto degli *storm surges*, in termini di frequenza e intensità, in funzione delle proiezioni dei modelli climatici e degli scenari adottati; i periodi di interesse sono i trentenni 2021-2050 e 2071-2100 e il periodo di riferimento è il 1976-2005. È stato seguito un approccio

statistico, consistente nell'analisi della frequenza con cui il livello marino supera determinate soglie di altezza riferite allo Zero IGM1942. Considerate le serie temporali disponibili, lo studio si è concentrato sui dati di Trieste, Grado e Lignano Sabbiadoro.

Dati e metodi

Le osservazioni del livello marino sono relative alle stazioni di Trieste Molo Sartorio, Grado Molo Torpediniere e Lignano Sabbiadoro Darsena. I dati di Trieste provengono dall'archivio dell'Istituto di Scienze Marine del CNR e coprono l'intero periodo 1976-2005 (i dati orari iniziano nel 1939); essi sono originariamente riferiti allo Zero Istituto Talassografico, che si trova 166.899 cm sotto lo Zero IGM1942 (Stravisi e Purga, 1997). La serie temporale di Grado inizia nel 1991 e quella di Lignano nel 2000; i dati di queste stazioni provengono dal Servizio Laguna di Venezia dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, www.venezia.isprambiente.it) e sono originariamente riferiti allo Zero Mareografico Punta Salute di Venezia, che è situato a 23.56 cm sotto lo Zero IGM1942 (APAT, 2006). I livelli medi annuali delle tre stazioni per il periodo di riferimento sono mostrati in fig. 3.2.1.

fig. 3.2.1 – Livello marino medio annuale a Trieste, Grado e Lignano rispetto allo Zero IGM1942. Dati CNR, Istituto di Scienze Marine e ISPRA.

I modelli climatici sono EC-EARTH_CCLM4-8-17, EC-EARTH_RACMO22E, EC-EARTH_RCA4, HadGEM2-ES_RACMO22E e MPI-ESM-LR_REMO2009. Ciascuno di essi fornisce un *run 'historical'*, per il periodo 1/1/1976-31/12/2005, e tre *run* per il periodo 1/1/2006-31/12/2100, uno per ciascuno scenario RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Per la descrizione dei modelli e degli scenari si rimanda al cap. 1.2.

Dapprima è stato valutato l'impatto dei diversi modelli climatici selezionati nella generazione degli *storm surges* nei vari periodi di studio. A questo scopo, piuttosto che considerare il livello estremo raggiunto, è opportuno avvalersi del livello residuo, detto anche marea meteorologica, che è la componente del livello marino collegata al forzante atmosferico (pressione atmosferica e vento). Per il periodo di riferimento 1976-2005 sono state quindi costruite distribuzioni di frequenza, relative al superamento di varie soglie di altezza da parte dei livelli residui medi giornalieri osservati e di quelli stimati a partire dalla pressione atmosferica e dal vento dei modelli climatici. Non sono state riscontrate significative differenze nelle distribuzioni ottenute dalle osservazioni e dai modelli, cosa che autorizza a considerare la variabilità del livello marino nel trentennio 1976-2005 rappresentativa anche dei trentenni di studio

futuri. La casistica relativa a tali trentenni è stata quindi simulata sommando alle osservazioni del 1976-2005 le variazioni di livello medio riportate per il 2021-2050 e 2071-2100 dall'IPCC (www.ipcc.ch; Church et al., 2013), nonché l'eventuale effetto del movimento verticale del suolo.

Riguardo al livello medio, l'IPCC adotta come periodo di riferimento il 1986-2005, rispetto al quale, per ogni scenario, si hanno le variazioni del livello marino medio (LMM) riportate in tab. 3.2.1. Dai dati di Trieste si rileva che il livello medio nel 1986-2005 è più alto di quello del 1976-2005 di 0.16 cm, differenza del tutto trascurabile rispetto alle variazioni riportate in tab. 3.2.1; per coerenza con il periodo *'historical'*, è stato quindi adottato come riferimento il periodo 1976-2005. Infine, è stato stimato un livello medio di riferimento più coerente con quello globale, rimuovendo dal calcolo il periodo corrispondente all'anomalia osservata nel Mediterraneo rispetto all'Oceano e ottenendo il valore -2.44 cm rispetto allo Zero IGM1942.

Per ovviare alla limitata durata delle serie temporali di Grado e Lignano, i loro livelli medi del periodo di riferimento 1976-2005 sono stati stimati per confronto con i dati di Trieste.

tab. 3.2.1 – Variazioni del livello marino medio (LMM) rispetto al 1986-2005 secondo Church et al. (2013). I valori in parentesi rappresentano gli estremi della banda di incertezza.

Scenario	LMM(2021-2050) – LMM(1986-2005) (cm)	LMM(2071-2100) – LMM(1986-2005) (cm)
RCP2.6	15.125 (10.920-19.360)	37.770 (24.885-51.135)
RCP4.5	15.135 (11.135-19.205)	44.000 (30.495-58.315)
RCP8.5	16.170 (12.005-20.430)	57.025 (41.340-74.405)

Relativamente al movimento verticale del suolo, sono state adottati valori rappresentativi, ottenuti sulla base delle informazioni tratte da livellazioni geodetiche e, circa dal 2000, altezze del *Global Positioning System* (GPS). Per Trieste, dalle livellazioni dei capisaldi situati sul Molo Sartorio, è riportato un aumento di quota dal 1956 al 2002 alla velocità media di +0.07 cm/a, peraltro comprendente un notevole aumento tra il 1977 e il 1989, a oltre +0.55 cm/a, e una successiva diminuzione fino al 2002 a circa -0.35 cm/a (Lama e Corsini, 2000; Zambon, 2003, comunicazione personale). Per il periodo 2003-2015 Baldin (2017) riporta velocità medie attorno a -0.1 cm/a tratte da dati GPS della stazione TRIE, che, però si trova a Borgo Grotta Gigante, a circa 7 km dal Molo Sartorio e su suolo geologicamente diverso, quindi non necessariamente rappresentativa del sito del mareografo. Data la contraddittorietà delle informazioni, in questo lavoro non viene considerato l'effetto del movimento verticale del suolo a Trieste.

Per Lignano il suolo è considerato stabile, essendo la velocità verticale dal 1980 al 1989 di -0.01 cm/a in prossimità di Porto Lignano, a meno di 1 km dal mareografo (FVG, 1990).

Per Grado, FVG (1990) riporta una velocità verticale media nel periodo 1968-1989 di -0.20 cm/a sul Lungomare Sauro, a meno di 1 km dal Molo Torpediniere. Marchesini (2006) riporta valori di -0.23 cm/a nel 1980-2004 e -0.14 cm/a nel 1997-2004. Dal GPS situato sulla cabina mareografica si ricava una velocità di -0.12 cm/a nel 2010-2015 (Baldin, 2017). Adottiamo per Grado un valore rappresentativo di -0.15 cm/a, che si traduce in un abbassamento complessivo del suolo, dal 1976-2005, di 6.75 cm nel 2021-2050 e di 14.25 cm nel 2051-2100.

Impatti futuri

L'impatto degli *storm surges* è stato quantificato studiando le distribuzioni di frequenza del superamento di varie soglie di altezza da parte delle massime altezze giornaliere del livello. Per non sopravvalutare singoli valori orari eccezionali, la massima altezza giornaliera è stata definita come media dei tre valori orari attorno al valore di picco.

Sono state prodotte distribuzioni relative alle osservazioni di Trieste, per il periodo 1976-2005, di Grado, per il 1991-2005, e di Lignano, per il 2000-2005; queste distribuzioni costituiscono le condizioni di riferimento nel clima presente. Le condizioni future sono state simulate sommando alle osservazioni le variazioni di livello medio riportate in tab. 3.2.1 e, solo per Grado, anche l'effetto dell'abbassamento del suolo. Da notare che, per ogni periodo futuro e scenario, si hanno tre valori, per tener conto dell'incertezza associata alle proiezioni. Le fig. 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4 mostrano, rispettivamente per Trieste, Grado e Lignano, il numero di giorni nell'anno solare e nel semestre ottobre-marzo, in cui la massima altezza giornaliera supera soglie di altezza variabili da -20 a 180 cm rispetto allo Zero IGM1942. Sono presentati i risultati ottenuti dalle osservazioni del 1976-2005 di Trieste, 1991-2005 di Grado e 2000-2005 di Lignano (curve nere) e negli scenari futuri per i periodi 2021-2050 (curve blu) e 2071-2100 (curve rosse); le curve continue corrispondono ai valori centrali del livello medio previsto e quelle tratteggiate agli estremi delle bande di incertezza (vedi tab. 3.2.1). Le tab. 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4, sempre rispettivamente per Trieste, Grado e Lignano, riassumono i dati relativi al periodo *'historical'* (HIS) e ai valori centrali dei livelli medi futuri nel 2021-2050 (F1) e 2071-2100 (F2). Per semplicità non sono state riportate le statistiche relative agli estremi delle bande di incertezza sul livello medio futuro.

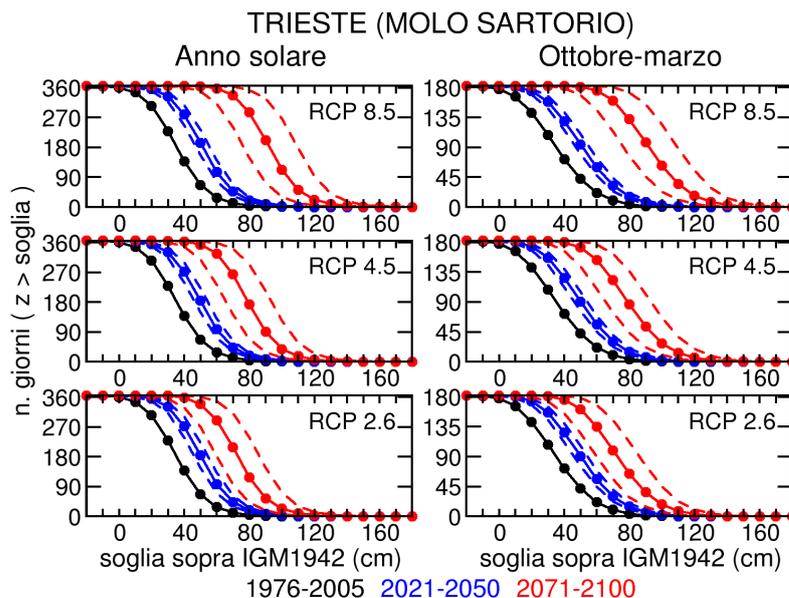
Considerazioni conclusive

Data una certa soglia, è evidente l'incremento del numero di giorni in cui essa viene superata in conseguenza dell'aumento del livello medio marino, particolarmente alla fine del XXI secolo; va comunque sottolineata la notevole incertezza dei risultati legata a quella sul livello medio, specie per le soglie intermedie.

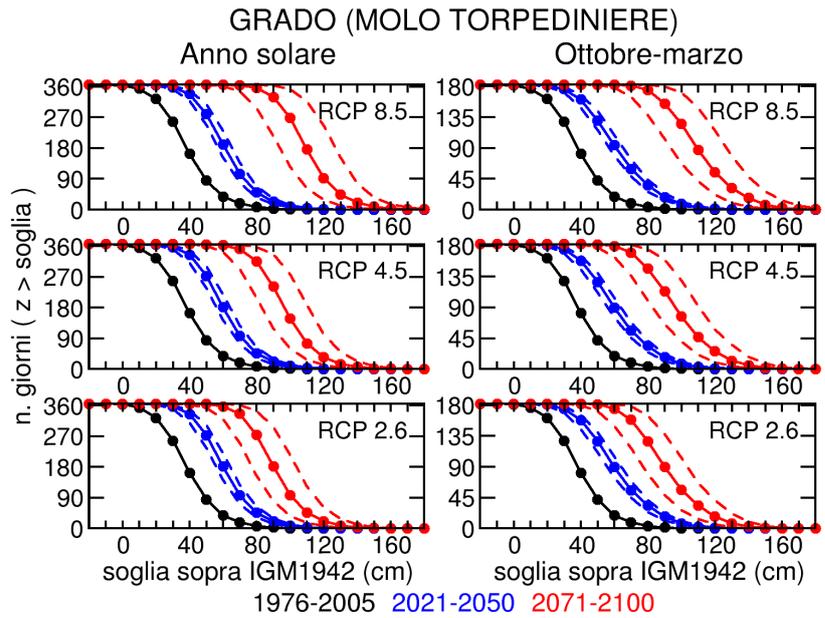
Durante uno *storm surge* il livello marino può raggiungere altezze distribuite in un ampio intervallo, poiché si combinano l'effetto del forzante atmosferico e l'altezza della marea astronomica. È chiaro che il fenomeno ha un impatto significativo solo nei casi in cui l'altezza complessiva supera soglie prossime a quelle critiche per le attività umane, per esempio limitando lo scarico in mare delle acque fluviali e delle fognature oppure allagando aree urbane e agricole.

Come esempio, nelle tab. 3.2.2, 3.2.3 e 3.2.4 sono state separate le soglie di altezza che sono superate in più o meno del 10% dei giorni (36 nell'anno solare e 18 in ottobre-marzo). Nel clima presente queste soglie sono tra 50-60 cm a Trieste per l'anno solare e 60-70 cm in tutti gli altri casi. Anche nello scenario meno severo (RCP2.6) si nota già a metà secolo un aumento di tali soglie di circa 20 cm, e a fine secolo a Trieste e Lignano esso è attorno a 40 cm e a Grado di circa 50 cm. L'aumento a fine secolo nello scenario più pessimistico (RCP8.5) ammonta a 60-70 cm, portando le soglie a 110-120 cm a Trieste, 120-130 a Lignano e 130-140 a Grado. Notiamo che altezze di 100-120 cm sono vicine a quelle delle zone marittime dei centri abitati (FVG, 2017), per cui, nel clima futuro, gli allagamenti di tali zone potrebbero essere alquanto frequenti in qualsiasi scenario. Inoltre, eventi caratterizzati da altezze oltre i 120-130 cm, che nel clima presente sono pressoché sconosciuti, a Trieste e Lignano potrebbero verificarsi 10-20 volte l'anno, quasi tutti nel semestre ottobre-marzo, e a Grado quasi un giorno su tre, diventando praticamente normali.

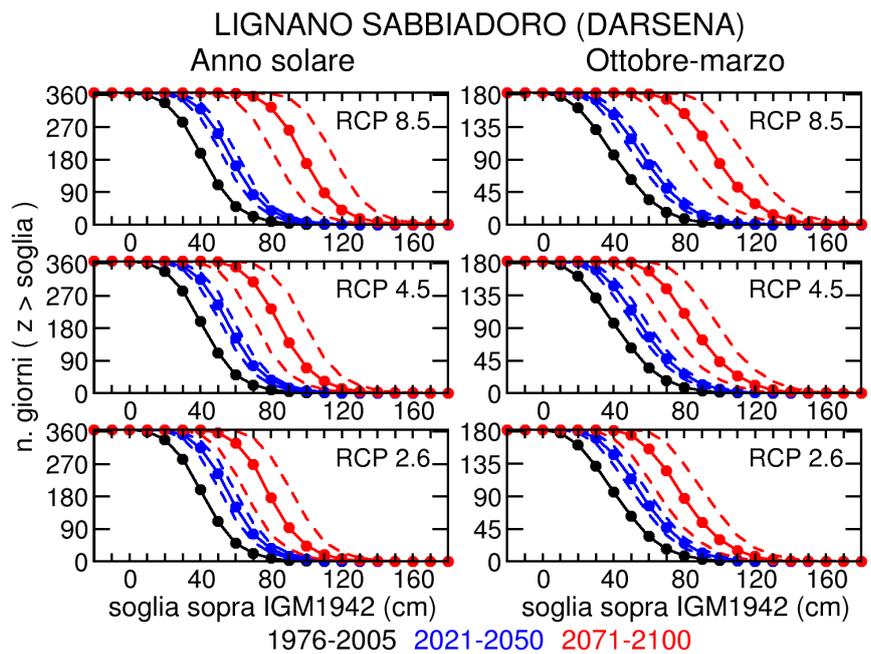
Da notare anche che, data una certa soglia, generalmente l'aumento relativo della frequenza è maggiore nell'anno solare rispetto al semestre autunno-inverno. Questo avviene poiché il più alto livello medio futuro potrebbe consentire il raggiungimento di notevoli altezze anche in estate, cosa molto rara nel clima presente.

fig. 3.2.2 – Numeri di giorni in cui il livello massimo giornaliero a Trieste supera soglie di altezza, da osservazioni del 1976-2005 (nero) e scenari relativi al 2021-2050 (blu) e al 2071-2100 (rosso). Statistiche relative all'anno solare (sinistra) e al periodo ottobre-marzo (destra).

tab. 3.2.2 – Dati corrispondenti alle curve continue di fig. 3.2.2, per il 1976-2005 (HIS) e per gli scenari del 2021-2050 (F1) e 2071-2100 (F2), per le soglie da 10 a 180 cm. M corrisponde a 'mai', S a 'sempre'. In ogni colonna il tratto orizzontale separa le soglie superate in meno (sotto il tratto) o più (sopra) del 10% dei giorni.

TRIESTE (MOLO SARTORIO)															
Anno solare								Ottobre-marzo							
soglia		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5		soglia		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
cm	HIS	F1	F2	F1	F2	F1	F2	cm	HIS	F1	F2	F1	F2	F1	F2
180	M	M	M	M	M	M	M	180	M	M	M	M	M	M	M
170	M	M	M	M	M	M	<1	170	M	M	M	M	M	M	<1
160	M	M	M	M	<1	M	<1	160	M	M	M	M	<1	M	<1
150	M	M	<1	M	<1	M	1	150	M	M	<1	M	<1	M	1
140	M	M	<1	M	1	M	3	140	M	M	<1	M	1	M	3
130	M	<1	1	<1	3	<1	9	130	M	<1	1	<1	2	<1	8
120	M	<1	4	<1	7	<1	22	120	M	<1	3	<1	6	<1	17
110	<1	1	10	1	17	1	51	110	<1	1	8	1	13	1	35
100	1	3	23	3	39	3	112	100	1	2	18	2	27	3	62
90	2	8	54	8	90	9	202	90	2	7	36	7	53	7	97
80	5	18	118	19	174	20	285	80	4	15	64	15	87	16	132
70	12	43	209	43	263	47	337	70	10	30	100	30	123	32	160
60	28	98	290	98	326	105	358	60	21	56	135	56	153	60	175
50	66	184	339	184	353	194	364	50	42	91	161	91	172	94	181
40	138	272	358	272	363	279	S	40	72	126	176	126	180	129	S
30	229	331	364	331	S	334	S	30	108	156	181	156	S	158	S
20	305	355	S	355	S	356	S	20	142	173	S	173	S	174	S
10	346	363	S	363	S	364	S	10	166	180	S	180	S	181	S
0	360	S	S	S	S	S	S	0	178	S	S	S	S	S	S

fig. 3.2.3– Come fig. 3.2.2, ma per Grado.

tab. 3.2.3– Come tab. 3.2.2, ma per Grado.

GRADO (MOLO TORPEDINIERE)															
Anno solare								Ottobre-marzo							
soglia		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5		soglia		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
cm	HIS	F1	F2	F1	F2	F1	F2	cm	HIS	F1	F2	F1	F2	F1	F2
180	M	M	M	M	M	M	<1	180	M	M	M	M	M	M	<1
170	M	M	M	M	<1	M	1	170	M	M	M	M	<1	M	1
160	M	M	<1	M	1	M	3	160	M	M	<1	M	1	M	3
150	M	M	1	M	2	M	8	150	M	M	1	M	2	M	7
140	M	M	3	M	6	M	21	140	M	M	3	M	5	M	17
130	M	<1	9	<1	14	<1	43	130	M	<1	8	<1	12	<1	31
120	M	1	22	1	34	1	92	120	M	1	17	1	26	1	54
110	<1	3	46	3	75	4	176	110	<1	3	34	3	46	3	87
100	1	9	97	9	148	9	268	100	<1	8	56	8	77	8	125
90	3	21	182	21	241	23	329	90	1	17	90	17	114	18	155
80	7	46	273	46	315	51	356	80	4	34	127	34	147	36	174
70	18	96	335	96	351	104	364	70	9	56	158	56	170	59	181
60	38	181	357	181	362	191	S	60	19	90	175	90	180	94	S
50	85	272	364	272	365	279	S	50	42	127	181	127	S	130	S
40	163	335	S	335	S	338	S	40	81	158	S	158	S	161	S
30	257	357	S	357	S	358	S	30	128	175	S	175	S	176	S
20	324	364	S	364	S	364	S	20	162	181	S	181	S	181	S
10	354	S	S	S	S	S	S	10	177	S	S	S	S	S	S
0	363	S	S	S	S	S	S	0	181	S	S	S	S	S	S

fig. 3.2.4– Come fig. 3.2.2, ma per Lignano.

tab. 3.2.4– Come tab. 3.2.2, ma per Lignano.

LIGNANO SABBIADORO (DARSENA)															
Anno solare								Ottobre-marzo							
soglia		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5		soglia		RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
cm	HIS	F1	F2	F1	F2	F1	F2	cm	HIS	F1	F2	F1	F2	F1	F2
180	M	M	M	M	M	M	<1	180	M	M	M	M	M	M	<1
170	M	M	M	M	<1	M	1	170	M	M	M	M	<1	M	1
160	M	M	<1	M	<1	M	1	160	M	M	<1	M	<1	M	1
150	M	M	1	M	1	M	3	150	M	M	1	M	1	M	2
140	M	<1	1	<1	2	<1	7	140	M	<1	1	<1	2	<1	7
130	M	<1	3	<1	5	1	17	130	M	<1	2	<1	5	1	14
120	<1	1	8	1	13	1	41	120	<1	1	7	1	11	1	29
110	1	2	19	2	32	3	88	110	1	2	15	2	24	2	52
100	2	6	43	6	70	7	169	100	1	6	31	6	44	6	85
90	4	14	93	14	140	16	262	90	3	12	54	12	74	13	123
80	9	36	176	37	234	39	325	80	8	26	88	26	110	28	154
70	23	76	269	76	308	84	356	70	17	47	126	47	145	51	174
60	51	152	328	153	349	163	364	60	35	77	156	78	169	83	181
50	111	244	357	244	364	253	S	50	63	114	175	115	181	119	S
40	198	315	364	315	S	321	S	40	96	148	181	148	S	152	S
30	284	352	S	352	S	354	S	30	132	171	S	171	S	173	S
20	338	364	S	364	S	364	S	20	162	181	S	181	S	181	S
10	360	S	S	S	S	S	S	10	178	S	S	S	S	S	S
0	S	S	S	S	S	S	S	0	S	S	S	S	S	S	S

3.3 Dissesto idrogeologico: estremi precipitativi ed eventi alluvionali

Andrea Cicogna[1], Valentina Gallina[2], Arturo Pucillo[1]
[1] ARPA-FVG – S.O.C. Osmer
[2] ICTP

Sono state analizzate le precipitazioni giornaliere di tre eventi alluvionali molto significativi del passato in FVG: l'alluvione di Latisana del 1966, l'alluvione nel pordenonese del novembre 2002 e l'alluvione in Valcanale dell'agosto 2003. Per il futuro i modelli climatici utilizzati indicano come, per le stesse località e per gli stessi livelli di precipitazione analizzati negli esempi storici, i tempi di ritorno delle piogge estreme potrebbero diminuire. Quindi, rispetto allo stato attuale e in funzione dei diversi scenari di emissione, eventi simili a quelli analizzati potrebbero riproporsi in futuro con maggiore frequenza.

Sintesi

Dopo un'introduzione alla problematica sulle alluvioni, sono stati analizzati tre eventi molto significativi del passato: l'alluvione di Latisana del 1966, l' alluvione nel pordenonese del novembre 2002 e l'alluvione in Valcanale dell'agosto 2003. Questi esempi illustrano chiaramente come precipitazioni giornaliere molto intense, che si ripresentano raramente con tempi di ritorno di decine o centinaia di anni, possano determinare eventi alluvionali importanti.

I modelli climatici per il futuro utilizzati in questa analisi indicano come, per le stesse località e per gli stessi livelli di precipitazione analizzati negli esempi storici, i tempi di ritorno di queste piogge estreme potrebbero diminuire. Quindi, rispetto allo stato attuale e in funzione dei diversi scenari di emissione, eventi simili a quelli analizzati potrebbero riproporsi in futuro con maggiore frequenza.

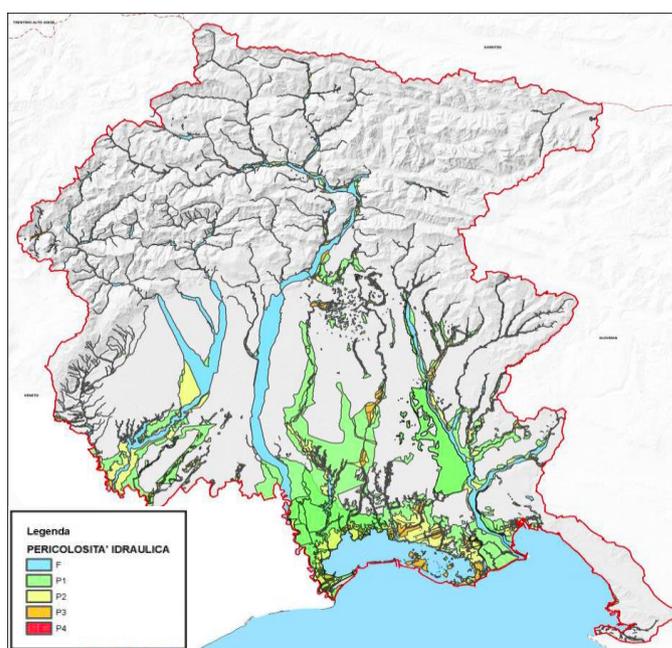
Questi risultati possono essere perfezionati considerando anche l'apporto nivale e, ancor più, utilizzando opportuni modelli idrogeologici di simulazione. Infine, si pone l'attenzione sull'importanza di considerare gli scenari futuri di cambiamenti climatici per definire gli strumenti di pianificazione (ad es. PAI e PGRA) e per l'implementazione di misure di adattamento su una scala temporale a lungo termine.

Evidenze attuali[5]

In Friuli Venezia Giulia quello idraulico è uno dei più importanti fattori di rischio presenti nei fondovalle della zona montana e pedemontana e nella media e bassa pianura friulana, vista la complessa e articolata rete idrica presente e considerata, inoltre, l'esistenza di estese aree soggette a scolo meccanico.

Questo rischio è determinato sia dalle possibili alluvioni causate dalle piene che interessano la rete idrografica, sia dalle possibili difficoltà di smaltimento delle acque meteoriche locali da parte delle reti dedicate, nelle aree urbane, e dagli scoli, in quelle agricole.

Per fornire una perimetrazione delle aree del territorio da sottoporre a misure di salvaguardia e per la determinazione delle misure stesse, l'Autorità di Bacino delle Alpi Orientali ha redatto i Piani di Assetto Idrogeologico (PAI).

fig. 3.3.1 – PAI dei bacini regionali. Fonte: RAFVG, 2015

[5] Testo tratto da RAFVG, 2015.

Le mappe di pericolosità contenute nel PAI (ad es. fig.3.3.1) forniscono informazioni in termini di probabilità. Le aree esondabili cartografate non corrispondono necessariamente a scenari di piena ben definiti, ma rappresentano lo sviluppo dei possibili scenari che, con probabilità assegnata, potrebbero verificarsi lungo una determinata tratta fluviale e sono utili principalmente per la pianificazione urbanistica.

Il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA), invece, riguarda tutti gli aspetti legati alla gestione del rischio di alluvioni: la prevenzione, la protezione e la preparazione, comprendendo al suo interno anche la fase di previsione delle alluvioni e i sistemi di allertamento, oltre alla gestione in fase di evento. Anche per il PGRA le mappe di pericolosità devono mostrare le aree geografiche soggette a possibili allagamenti secondo diversi scenari (i.e. tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni), mentre le mappe di rischio di alluvione devono mostrare le potenziali conseguenze negative di questi scenari, in conformità con la Direttiva alluvioni (2007/60/CE), al fine di ridurre le potenziali conseguenze negative che un simile evento potrebbe avere per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e l'attività economica.

Il caso studio qui proposto è in sintonia a quanto indicato nell'articolo 4 comma 2 dalla Direttiva alluvioni 2007/60/CE (CE, 2007), che richiede di effettuare un'analisi di rischio alluvioni "sulla base delle informazioni disponibili o di quelle facili da ottenere, quali i dati registrati e gli studi sugli sviluppi a lungo termine, tra cui in particolare le conseguenze del cambiamento climatico sul verificarsi delle alluvioni" ed in particolare (articolo 4 comma 2b) una "descrizione delle alluvioni avvenute in passato, che hanno avuto notevoli conseguenze negative per la salute umana, l'ambiente, il patrimonio culturale e le attività economiche e che con elevata probabilità possono ancora verificarsi in futuro in maniera simile".

A partire da questa premessa verranno analizzati alcuni eventi alluvionali rappresentativi per il Friuli Venezia Giulia, ponendo l'attenzione soprattutto alle precipitazioni giornaliere massime. Allo stesso modo, i dati simulati per il futuro, saranno utilizzati in modo comparativo per evidenziare i potenziali eventi alluvionali futuri simili a quelli storici qui illustrati.

Metodologia

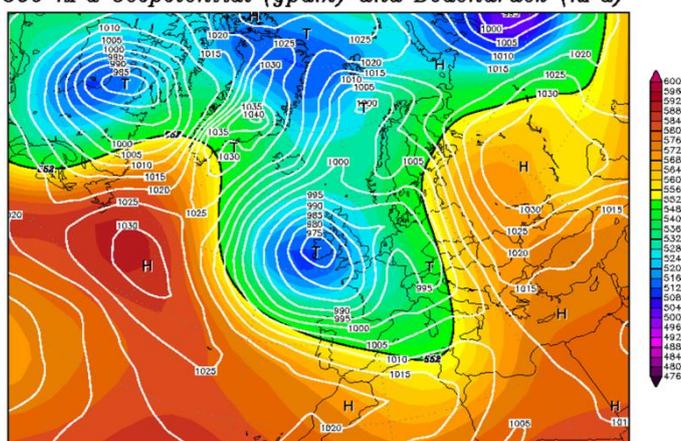
Eventi alluvionali passati

La regione Friuli Venezia Giulia si contraddistingue per un regime pluviometrico piuttosto elevato, specialmente nell'area alpina e, ancor più, prealpina, nonché per un marcato gradiente pluviometrico annuale tra la zona montana, la pianura e la costa; la pioggia media annuale di Trieste, a titolo di esempio, è meno di un terzo della pioggia annuale media delle Prealpi Giulie, pur essendo le due aree distanti solo 80 km. In questo contesto generale si sono innestati, nel recente passato, diversi episodi alluvionali caratterizzati da piogge intense in montagna e, in diversi casi, da conseguenze idrauliche manifestatesi anche in pianura lungo le aste principali dei fiumi.

In questa breve analisi vengono considerati tre episodi tra i più significativi: l'alluvione di Latisana del 4 novembre 1966, in seguito alla piena del fiume Tagliamento; l'alluvione di Pordenone del 25-26 novembre 2002, in seguito alla piena dei fiumi Meduna e Noncello; l'alluvione della Valcanale del 29 agosto 2003, in seguito alla piena del torrente Fella e di tutti i corsi d'acqua minori afferenti a quel bacino montano.

Latisana, 4 novembre 1966.

L'analisi meteorologica a scala sinottica di tale evento propone una classica configurazione ad "omega rovesciata" con due aree di alta pressione rispettivamente sull'Atlantico e sulla Russia ed una profonda bassa pressione tra le due, proprio in area mediterranea (fig. 3.3.2). La posizione decentrata verso la Penisola Iberica della depressione al suolo ha favorito la risalita di correnti meridionali lungo l'Adriatico verso il Friuli Venezia Giulia, con componente sudoccidentale in quota e sudorientale al suolo, accompagnata da due meccanismi tipici: il trasferimento di vapor d'acqua dal mare all'aria fino a renderla quasi satura (essendo calda perché proveniente da basse latitudini, la saturazione avviene con contenuti elevati di vapore d'acqua e con limite delle nevicate tipicamente alto, oltre le quote a cui arrivano i rilievi alpini orientali) e il sollevamento orografico forzato del flusso, a causa della conformazione orografica delle Alpi Orientali. Questa situazione è alquanto tipica, specie nelle stagioni intermedie; la particolarità di questo episodio risiede nella persistenza del flusso dovuto al cosiddetto "*blocking*" meteorologico sinottico: mentre di norma il flusso sciroccale prefrontale persiste per poche ore, in questo caso è rimasto semi-stazionario per 36 ore, determinando diffuse precipitazioni molto intense sull'area prealpina e alpina, in particolare della Carnia. Tenendo presente che molti bacini idrici alpini in territorio regionale afferiscono al Tagliamento, tutta la pioggia caduta in questo evento sulle Alpi si è riversata su questo fiume. Nella tab. 3.3.1 sono riportate le precipitazioni registrate in 24 e 48 ore. Nello specifico, sul bacino del Tagliamento è stata registrata una media di precipitazioni (dalle 17 stazioni presenti in tab. 3.3.1) in 24 ore di 337 mm: l'equivalente di 10 laghi di Sauris (volume pari a 80 milioni di m^3), cioè quasi 1 miliardo di metri cubi d'acqua. Nell'arco di 48 ore, sono stati raggiunti quasi 400 mm. Si può quindi notare come una pioggia estrema in un arco di sole 24 ore sia capace di produrre pressioni insostenibili per corsi d'acqua come il Tagliamento che, nell'occasione, è andato in crisi dove l'opera antropica lo ha costretto entro limiti non sostenibili, come l'area di Latisana verso la foce. Si tenga presente che il deflusso verso il mare, in questo caso, è stato ostacolato anche dall'effetto "storm surge" che caratterizza l'alto Adriatico in presenza di venti di Scirocco e bassa pressione.

fig.3.3.2 - carta di reanalisi al suolo e a 500 hPa delle ore 24:00 del 4 novembre 1966. A cura di NCEP-NOAA modello GFS.

tab.3.3.1 - cumulati di pioggia [mm] nelle stazioni meteorologiche principali - dati del Servizio Idrografico.

	24 ORE	1 G	**2 G**
FORNI DI SOPRA	335	227	370
SAURIS	279	182	296
LA MAINA	**410**	228	432
AMPEZZO	382	238	442
PESARIS	391	217	429
ZOVELLO	**430**	**430**	**598**
TIMAU	217	165	275
AVOSACCO	227	182	280
PAULARO	269	164	319
TOLMEZZO	375	295	441
OSEACCO	**413**	270	**505**
RESIA	**491**	289	**520**
MOGGIO UDINESE	378	251	441
VENZONE	288	239	368
GEMONA	262	215	314
ALESSO	335	285	405
CLAUZETTO	252	227	305

Pordenone, 25-26 novembre 2002.

La configurazione meteorologica di questo evento differisce leggermente da quella del 1966, in quanto l'attore principale è stato sempre un sistema depressionario instauratosi sul Mediterraneo occidentale (fig. 3.3.3), ma stavolta generato da una profonda saccatura atlantica (laddove nel 1966 in Atlantico c'era un'alta pressione). Ne sono risultate correnti meridionali in quota e più marcatamente sudorientali al suolo (il vero e proprio Scirocco), che hanno interagito con la barriera orografica delle Prealpi Carniche riversando, ad esempio, fino a circa 500 mm di pioggia in 48 ore in Val Cellina, con ripetute fasi di pioggia superiori ai 30 mm all'ora (fig. 3.3.4), valore tipico degli eventi misti di flusso/convettivi della tarda estate. In questo caso il bacino idrografico soggetto alle precipitazioni più intense afferisce al Meduna e al Noncello, mettendo in crisi Pordenone con vaste zone della città inondate dalle acque alluvionali. Anche in questo caso l'area soggetta a piogge molto intense (i.e. barriera orografica delle Prealpi Carniche) e quella effettivamente penalizzata dal punto di vista idraulico (i.e. Pordenone) non coincidevano.

fig. 3.3.3 - carte di reanalisi NCEP-GFS per il 25/11/2002: temperatura e geopotenziale a 500 e 850 hPa e umidità e geopotenziale a 700 hPa (dall'alto a sinistra in senso orario). A cura di NCEP-NOAA.

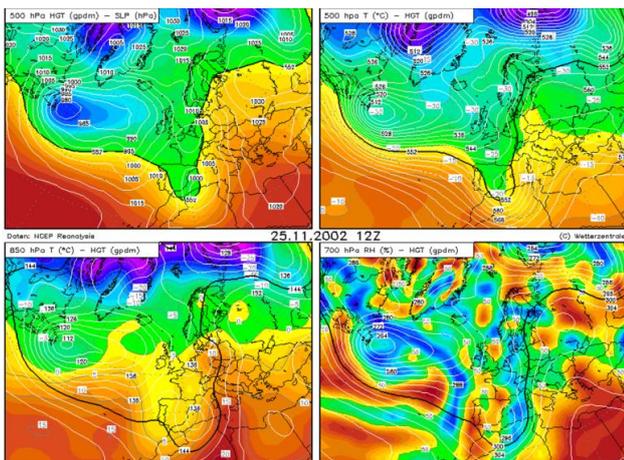
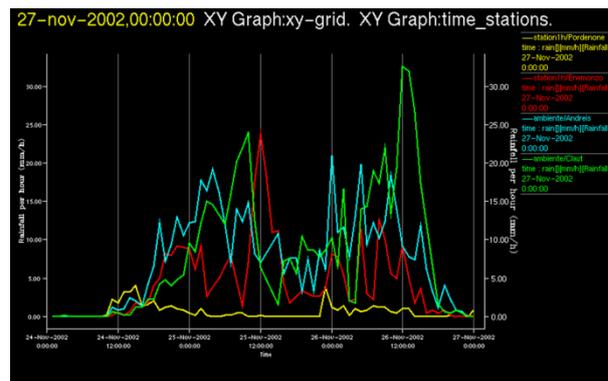
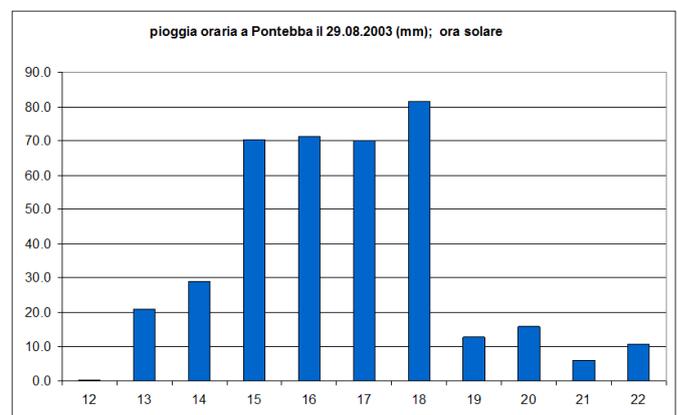
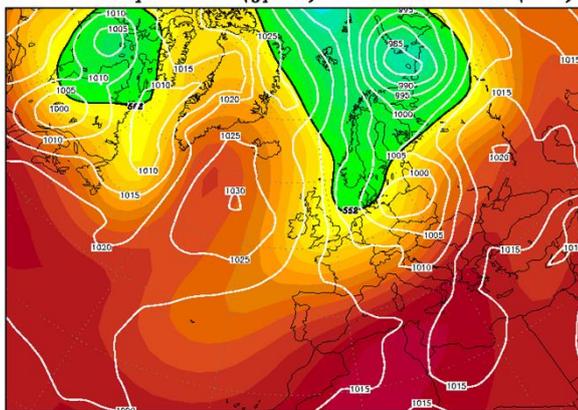



fig. 3.3.4 - serie temporale delle piogge orarie su diverse località di Alpi e Prealpi Carniche. Spicca, in verde, la località di Claut.

Valcanale, 29 agosto 2003.

L'alluvione della Valcanale del 29 agosto 2003 ha manifestato caratteristiche molto diverse. Essenzialmente spicca il carattere convettivo delle precipitazioni, con la presenza di temporali stazionari di poche ore sulla medesima zona (Valcanale e Canal del Ferro) e con una coincidenza sostanziale tra l'area colpita dalle piogge più intense e l'area colpita dall'alluvione (il medio e alto corso del Fella). Una tale dinamica si è innescata grazie all'interazione tra un promontorio anticiclonico sul Mediterraneo, una depressione atlantica, stavolta a basse latitudini, in spostamento verso il Mediterraneo, ed un fronte freddo di origine polare in moto dall'Europa centrale verso le Alpi (fig. 3.3.5). Questi ultimi due si sono fusi in un'unica struttura che ha acquisito forza e ha sospinto correnti sudoccidentali molto umide ed instabili verso le Alpi orientali, accompagnate da un notevole rinforzo del vento da sud nei bassi strati, caratterizzato da temperature e umidità molto alte (si era ancora in estate e per inciso l'estate 2003 è stata mediamente la più calda da quando si effettuano misure). In questo caso il sollevamento orografico non ha dato luogo a precipitazioni sul versante sopravento, ma l'intensità del flusso ha portato all'innesco di temporali sulle Alpi

più interne, in particolare nella zona tra Pontebba e Camporosso, dove si sono concentrate piogge, si stima, superiori ai 500 mm in 6 ore, con 4 ore consecutive di pioggia oraria pari o superiore ai 70 mm a Pontebba (tra l'altro in un'area leggermente discosta dal fulcro dei rovesci temporaleschi, fig 3.3.6). Con ogni evidenza una tale mole di acqua piovana riversatasi in così poco tempo non ha lasciato scampo a corsi d'acqua montani e l'alluvione è stata improvvisa e distruttiva, tanto che si è parlato di "*flash flood*", che ha lasciato due morti sul campo, nonché l'interruzione di molte strade e centinaia di case danneggiate, per un totale di 500 milioni di euro di danni.

fig.3.3.5 - reanalisi al suolo e a 500 hPa della NCEP-GFS della notte tra il 29 e il 30 agosto 2003.

fig.3.3.6 - istogramma temporale delle piogge orarie a Pontebba.

I tre casi illustrati in questo capitolo evidenziano che precipitazioni giornaliere estreme in un arco di sole 24 ore (ad es. superiori ai 300 mm/gg) sono in grado di generare pressioni insostenibili per i corsi d'acqua della nostra regione causando eventi alluvionali con danni anche ingenti.

Dati e metodi

La conoscenza dei tempi di ritorno di piogge massime in intervalli di tempo predeterminati diventa importante soprattutto nelle fasi di allerta meteo.

In letteratura è presente un ampio panorama di pubblicazioni che identifica quali sono le diverse metodologie con cui il calcolo dei tempi di ritorno deve essere eseguito. Inoltre esistono vari studi che già identificano, per il territorio regionale, quali sono i tempi di ritorno per le piogge intense.

L'attuale orientamento tecnico-scientifico nel calcolo dei tempi di ritorno è quello di utilizzare come algoritmo per la statistica dei valori estremi la distribuzione GEV (*General Extreme Value*, distribuzione generalizzata dei valori estremi). Tale indicazione è per esempio riportata nelle Linee Guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici raccomandati da ISPRA (ISPRA, 2013).

Una particolare distribuzione GEV (GEV di I livello), più immediata per calcolare i tempi di ritorno a partire dalle precipitazioni massime giornaliere, è quella di Gumbel (Gumbel E.J., 1935). La distribuzione GEV è usata per modellare i massimi di lunghe (finite) sequenze di dati, tuttavia, un data-set di grandi dimensioni (come ad esempio

dati giornalieri spazializzati sul territorio) non è soggetto a elaborazioni troppo semplicistiche utilizzando la distribuzione di Gumbel.

Considerando questi presupposti, le mappe e i grafici che verranno presentati nel paragrafo che segue sono stati elaborati attraverso l'utilizzo della distribuzione Gumbel. Tali risultati verranno presentati considerando le piogge massime e i tempi di ritorno nei trentenni storici e futuri (1976-2005, 2021-2050, 2071-2100) considerando l'intero territorio regionale e i siti specifici degli eventi alluvionali presentati nel capitolo precedente.

L'analisi dei tempi di ritorno sulle precipitazioni giornaliere è stata eseguita considerando i dati storici osservati in 121 stazioni della rete meteorologica regionale (cap 1.1) e i dati di precipitazione massime giornaliere estratti dai 5 modelli climatici presentati nel cap 1.2 e trattati attraverso opportuno *downscaling* e *bias-correction* (si veda cap 1.3).

Risultati

A partire dai presupposti emersi dall'analisi degli eventi alluvionali accaduti nella nostra regione che hanno causato danni alla popolazione e ai loro beni e dall'evidenza del cambiamento climatico tutt'ora già in atto, i risultati che seguono (mappe e grafici) hanno lo scopo di fornire delle stime su come tali cambiamenti potrebbero aumentare la probabilità che eventi di tale entità si manifestino in futuro.

La fig 3.3.7 mostra le piogge massime attese per il periodo storico 1976-2005 per le 121 stazioni della rete meteorologica regionale in base ai tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni rispettivamente (a, b, c). Le mappe evidenziano principalmente che la zona montana del FVG sia quella maggiormente interessata da precipitazioni intense e, considerando i tempi di ritorno più elevati, vi è un aumento dell'intensità delle piogge giornaliere massime soprattutto nell'area del Piancavallo e del gemonese. All'interno di ciascuna mappa, per ciascuno dei siti di rilevamento, sono stati evidenziati i valori (in mm/gg) delle piogge massime stimate in funzione dei tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni.

fig. 3.3.7 - Piogge massime giornaliere attese sulla base dei dati storici 1976 -2005 misurati per 121 stazioni con tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni rispettivamente (a, b, c). Fonte: ARPA-OSMER.

a)

b)

c)

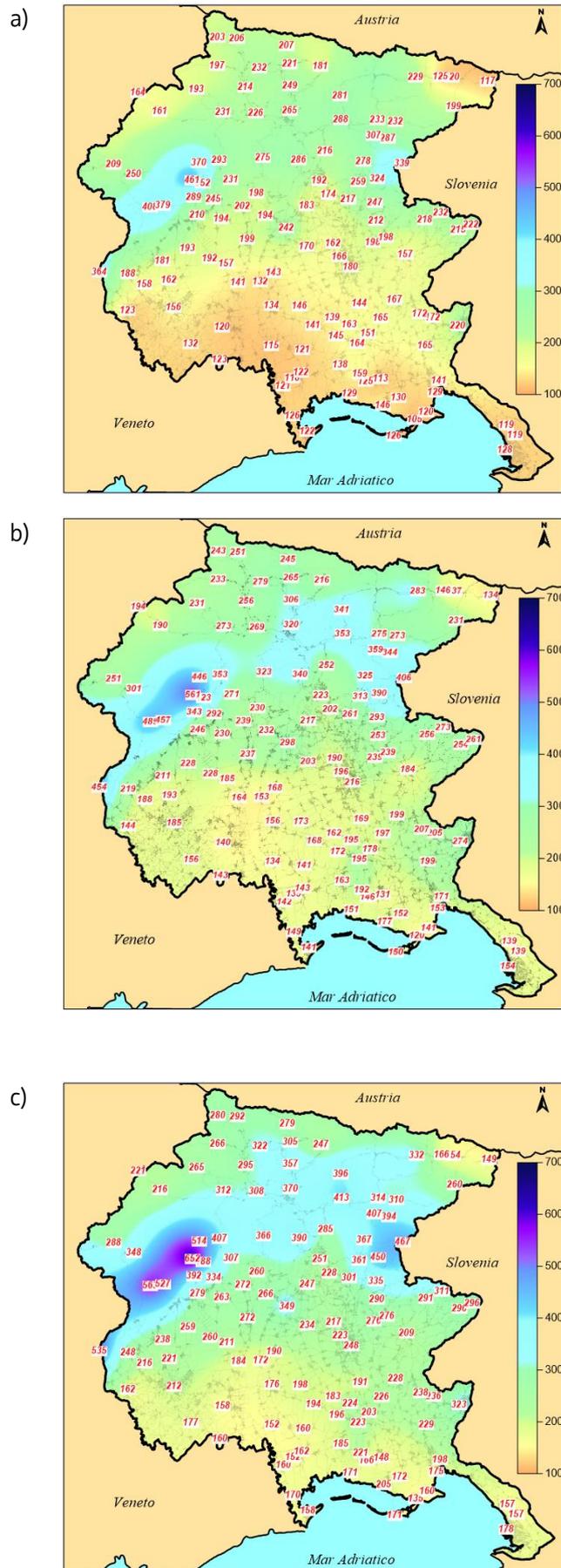
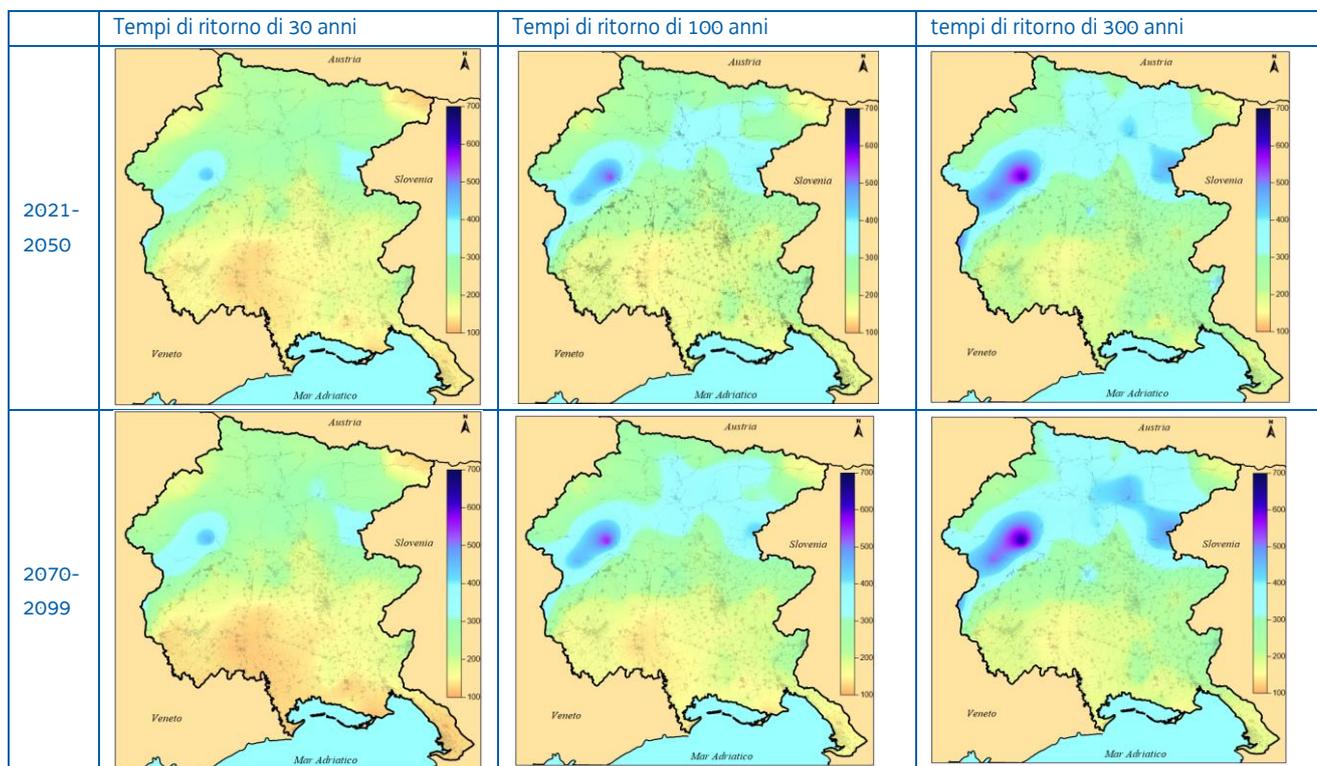
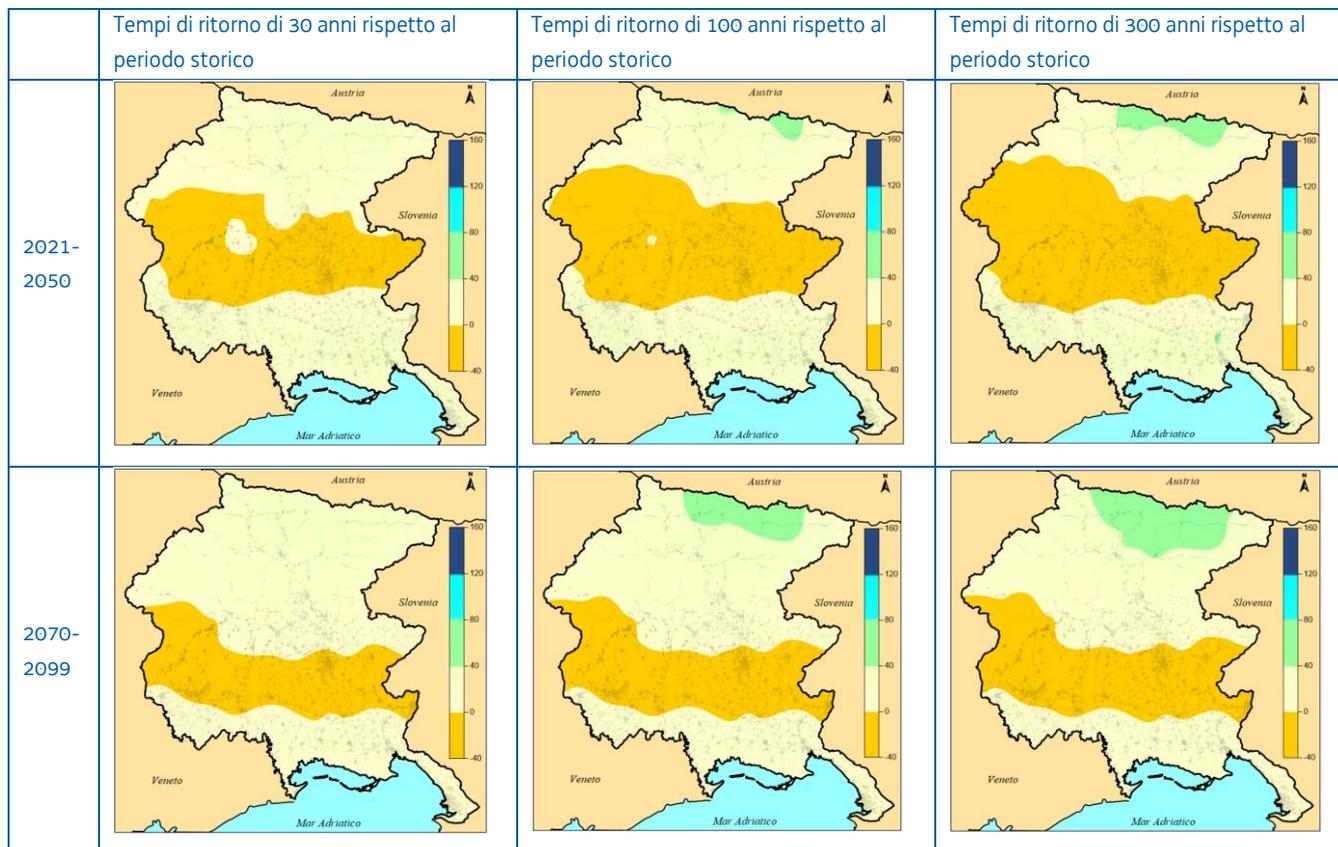



fig. 3.3.8 - Piogge massime giornaliere attese sulla base dei dati forniti dai modelli considerando lo scenario RCP 2.6 con tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni, per il trentennio futuro 2021-2070 e 2070-2099 rispettivamente. Elaborazione a cura di ARPA-OSMER.

	Tempi di ritorno di 30 anni	Tempi di ritorno di 100 anni	tempi di ritorno di 300 anni
2021-2050			
2070-2099			

Analogamente a quanto presentato per il trentennio di riferimento 1976-2005 in fig. 3.3.7, le figure 3.3.8 e 3.3.10 presentano le precipitazioni massime stimate per lo scenario RCP 2.6 e 8.5 per tempi di ritorno 30, 100 e 300, per i trentenni futuri 2021-2050 e 2070-2099. Le mappe della fig.3.3.8, per entrambi i trentenni futuri, non si discostano particolarmente dal trentennio di riferimento, prova ne è la fig. 3.3.9 che mostra la differenza tra i valori presentati in fig. 3.3.7 rispetto a quelli in fig.3.3.8. La fig. 3.3.9, infatti, mostra come per la maggior parte della regione la differenza col periodo di riferimento è poco sostanziale o nulla (i.e. da -40 a 40 mm/gg); si osserva un leggero aumento dell'intensità delle precipitazioni nell'area montana per i tempi di ritorno più elevati e per il trentennio futuro più lontano (i.e. 2070 – 2099).

Per quanto riguarda lo scenario RCP 8.5 (fig. 3.3.10), l'andamento risulta analogo a quello dell'RCP 2.6, anche se si riscontra un aumento dell'intensità nelle precipitazioni massime giornaliere nel trentennio 2070-2099 soprattutto per i tempi di ritorno di 100 e ancor più 300 anni. Le aree con le precipitazioni più elevate risultano essere, come per il periodo di riferimento (fig.3.3.7) quelle del Piancavallo e del gemonese (come evidenziano anche i dati osservati).

fig. 3.3.9 - Differenze nelle piogge massime giornaliere attese rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 sulla base dei dati forniti dai modelli considerando lo scenario RCP 2.6 con tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni, per il trentennio futuro 2021-2050 e 2070-2099 rispettivamente. Elaborazione a cura di ARPA-OSMER.

La fig. 3.3.11 è analoga alla fig. 3.3.9 ma riferita allo scenario RCP 8.5. In questo caso si nota un aumento dell'intensità delle precipitazioni massime attese sull'area montana anche considerevole (da 80 a 150 mm/gg) per il trentennio 2070-2099 soprattutto per i tempi di ritorno più elevati (100 e 300).

Questo significa da un lato che in futuro, per lo scenario RCP 8.5, le precipitazioni massime, per analoghi tempi di ritorno rispetto al periodo di riferimento, potrebbero subire un aumento anche sostanziale, dall'altro che il tempo di ritorno di eventi che in passato hanno creato dei danni rilevanti, potrebbero diminuire portando ad un aumento della probabilità che si verifichino alluvioni di elevata intensità.

fig. 3.3.10 - Piogge massime giornaliere attese sulla base dei dati forniti dai modelli considerando lo scenario RCP 8.5 con tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni, per il trentennio futuro 2021-2070 e 2070-2099 rispettivamente. Elaborazione a cura di: ARPA-OSMER.

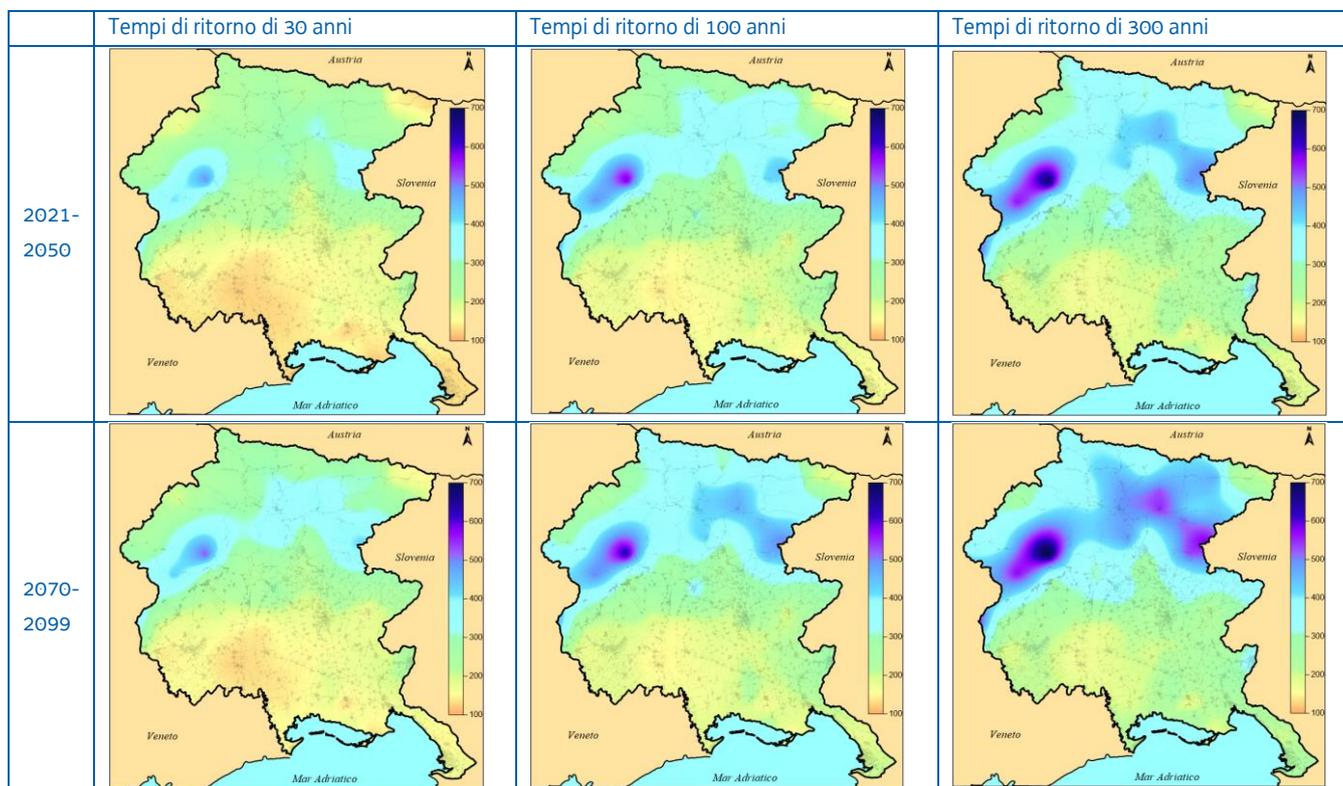



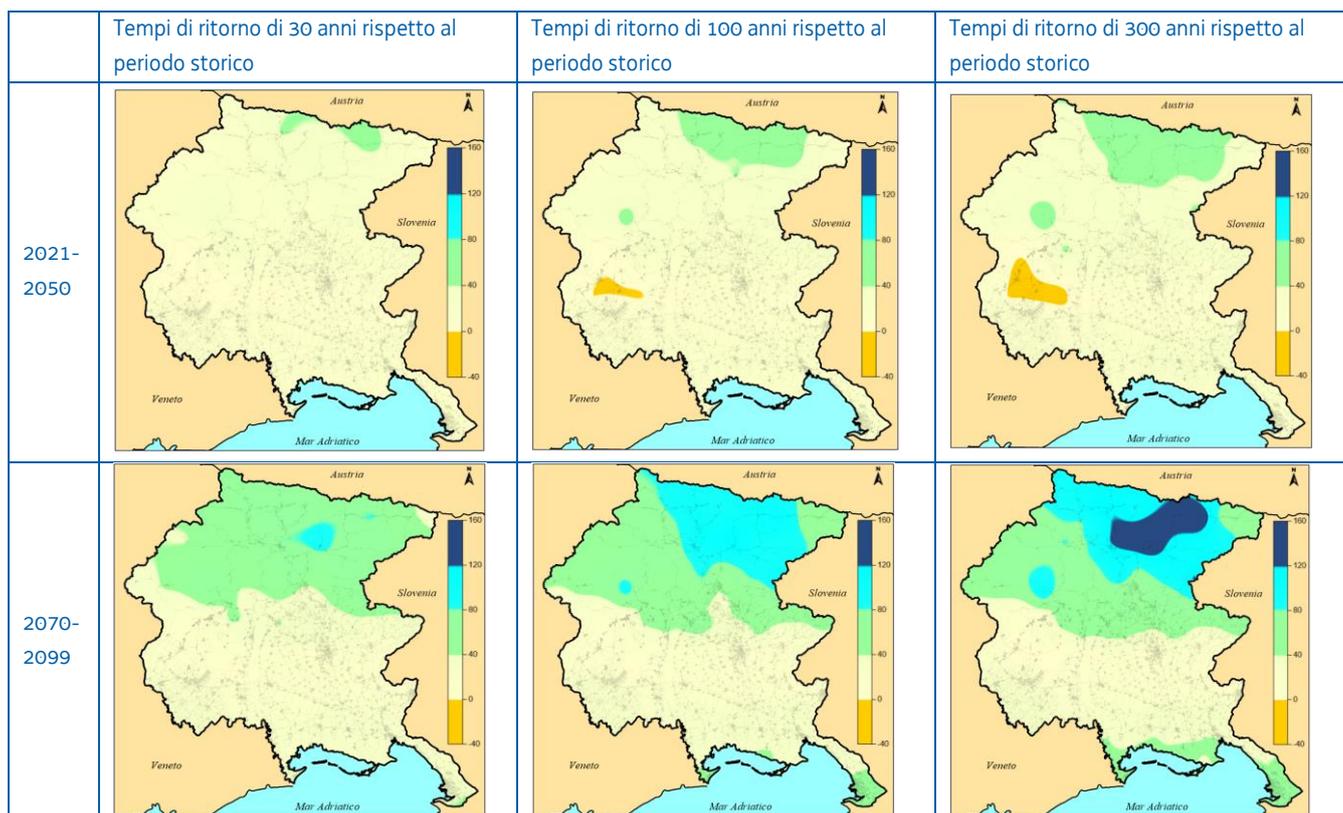
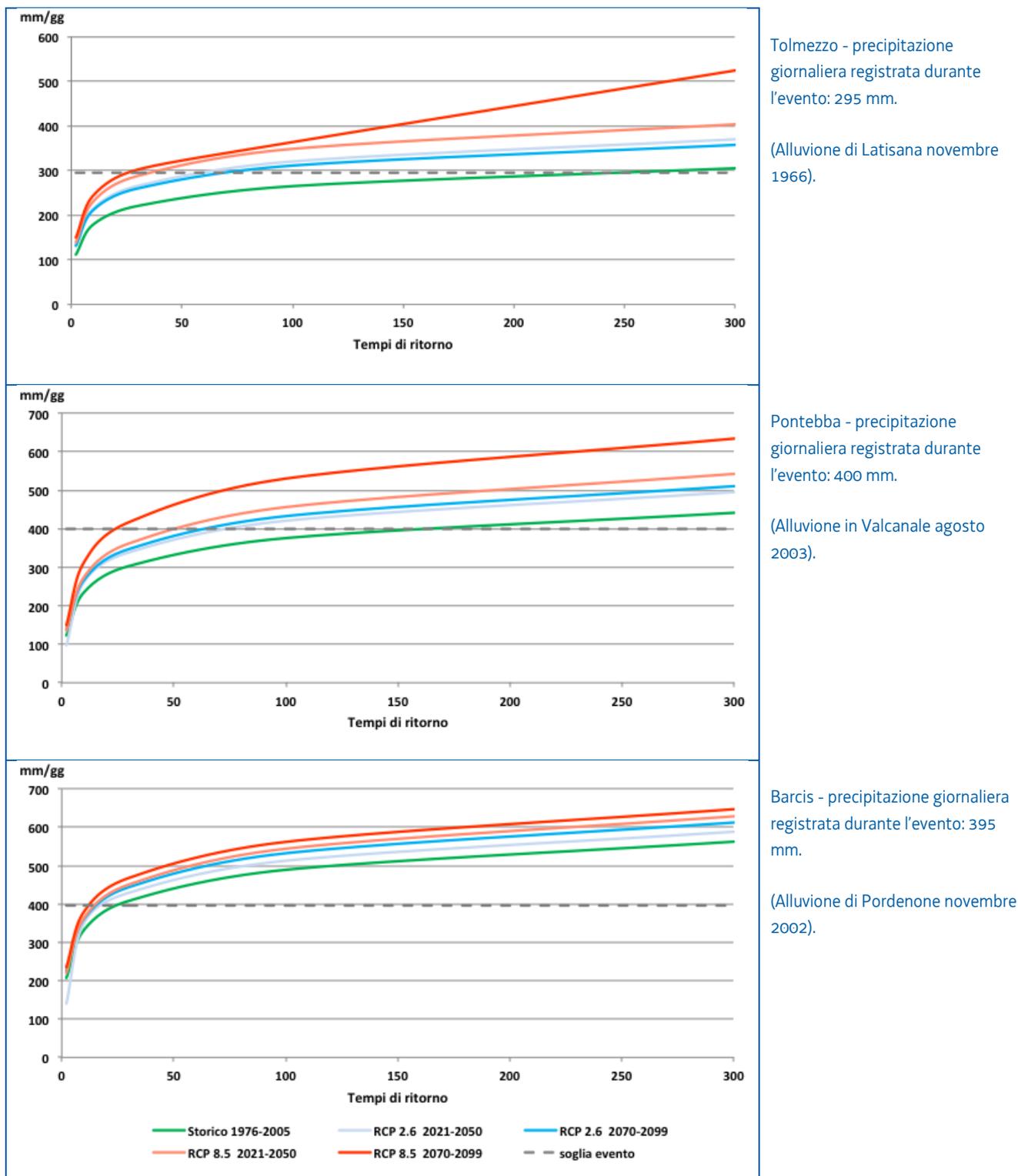
fig. 3.3.11 - Differenze nelle piogge massime giornaliere attese rispetto al periodo di riferimento 1976-2005 sulla base dei dati forniti dai modelli considerando lo scenario RCP 8.5 con tempi di ritorno di 30, 100 e 300 anni, per il trentennio futuro 2021-2050 e 2070-2099 rispettivamente. Elaborazione a cura di ARPA-OSMER

Un approfondimento ulteriore merita essere fatto per le aree che sono state fortemente colpite dalle alluvioni passate e che sono state presentate in precedenza.

fig. 3.3.12 – Piogge massime giornaliere attese in funzione dei tempi di ritorno per Tolmezzo, Pontebba e Barcis per gli scenari RCP 2.6 e 8.5 nel trentennio di riferimento 1976-2005, e nei trentenni futuri 2021-2050 e 2070-2099. Sono evidenziati i livelli giornalieri precipitativi che hanno determinato gli eventi alluvionali di Latisana, Valcanale e Pordenone. Fonte: ARPA-OSMER.

La fig. 3.3.12 mostra il variare delle piogge massime attese in funzione dei tempi di ritorno per il trentennio storico (1976-2005) e quelli futuri considerati (i.e., 2021-2050, 2070-2099) nei due scenari RCP 2.6 e 8.5.

Le tre stazioni evidenziate sono quelle dove, durante i tre eventi considerati, si sono registrate le piogge massime giornaliere più elevate che poi hanno alimentato (anche a valle) le alluvioni.

Si ricorda che i modelli climatici per le piogge future restituiscono come passo di integrazione minimo quello giornaliero ed è per questo che è stato scelto questo intervallo di analisi anche quando l’evento si è sviluppato con tempistiche più ridotte.

Specificatamente, per l’evento di Latisana (alluvione storica del 1966) la stazione di riferimento è quella di Tolmezzo, per quella della Valcanale (alluvione storica del 2003) è Pontebba e per quella di Pordenone (alluvione storica del 2002) è Barcis.

In generale si può osservare come a parità di piogge massime attese i tempi di ritorno tendono a ridursi passando dall’RCP 2.6 all’RCP 8.5 e passando dal trentennio 2021-2050 a quello 2070-2099. Questo vuol dire che eventi alluvionali simili a quelli analizzati (e già registrati in passato) potrebbero verificarsi in futuro con maggiore frequenza rispetto allo stato attuale.

A novembre 1966, quando si è verificata l’alluvione a Latisana, la pioggia massima giornaliera misurata a Tolmezzo è stata di 295 mm. Considerando il trentennio di riferimento 1976-2005 una pioggia di questa entità si ripresenta con un tempo di ritorno di circa 250 anni, ma, considerando le piogge massime giornaliere simulate dai modelli climatici per i trentenni futuri, si potrebbe passare a dei tempi di ritorno attorno ai 100 anni per l’RCP 2.6 e addirittura inferiori a 30 anni per l’RCP 8.5. Osservando questa analisi da un altro punto di vista si può rilevare come con un tempo di ritorno di 250 anni le piogge giornaliere massime attese da 295 mm del periodo storico potrebbero passare a quasi 500 mm nel trentennio 2070-2099 per lo scenario emissivo RCP 8.5.

Per l’alluvione in Valcanale, dove a Pontebba nella giornata si sono misurati 400 mm, per tale livello precipitativo si passerebbe da un tempo di ritorno di 150 anni a uno inferiore ai 100 anni per l’RCP 2.6 e inferiore a 30 anni per l’RCP 8.5 nel trentennio 2070-2099.

Infine, per l’evento del pordenonese la diminuzione del tempo di ritorno per la pioggia giornaliera di 395 mm (misurata a Barcis) non è così evidente. Anche in questo caso è comunque interessante rilevare come le piogge massime giornaliere attese con un tempo di ritorno di 300 anni potrebbero aumentare di circa 100 mm.

Considerazioni conclusive

Le elaborazioni di questo caso studio fanno concludere che i tempi di ritorno a parità di piogge massime attese dovrebbero diminuire, cioè eventi alluvionali simili a quelli analizzati (e già registrati in passato) potrebbero verificarsi in futuro con maggiore frequenza rispetto allo stato attuale. In un'altra prospettiva si può affermare che a parità di tempi di ritorno le piogge massime attese saranno più elevate e quindi questo potrebbe implicare eventi alluvionali più rilevanti.

Il caso studio considera gli eventi alluvionali analizzando il solo aspetto climatico (i.e. precipitazione massima giornaliera e suo tempo di ritorno), ma bisogna sottolineare come la pericolosità degli eventi alluvionali, soprattutto dei mesi autunnali di ottobre e novembre, potrebbe venire amplificata dalla fusione nivale dovuta ad eventi intensi di scirocco con zero termico elevato e presenza pregressa di neve al suolo. In queste circostanze vi potrebbe essere un aumento del volume di acqua che impegna i bacini idrici favorendo il rischio di alluvioni. Sarebbe utile inoltre

investigare sulla variazione e frequenza di eventi nevosi intensi per capire se questi, assieme a piogge intense sciroccali aumentino la probabilità che si verifichino eventi alluvionali.

È da notare che, vista l'altimetria media delle zona montana, la rilevanza di quest'ultimo aspetto deve essere comunque approfondito per il territorio del Friuli Venezia Giulia, mentre risulta già più significativa per le regioni limitrofe (ad es. Veneto).

Comunque analizzando i modelli climatici utilizzati in questo studio si nota come le precipitazioni nevose in futuro dovrebbero mediamente diminuire (vedi caso studio "Risorsa idrica") e di conseguenza lo strato di neve al suolo, anche in zona montana, risulterebbe mediamente più sottile rispetto ad oggi. Pertanto si può ipotizzare che durante gli eventi di pioggia sciroccale il contributo della fusione nivale non dovrebbe essere così rilevante.

Per contro si può ragionevolmente pensare che le precipitazioni al suolo nelle aree montane, nei mesi invernali, non andranno ad incrementare il manto nivale ma, cadendo come pioggia, potrebbero amplificare la probabilità che si inneschino eventi alluvionali anche in periodi oggi non tipici (ad es. gennaio).

Inoltre, sarebbe interessante poter stimare gli eventi alluvionali della nostra regione attraverso l'utilizzo di specifici modelli di simulazione idrodinamica che possano utilizzare non soltanto i dati storici misurati ma anche quelli provenienti da modelli climatici.

Comunque questo risultato preliminare pone l'attenzione sull'importanza di una pianificazione territoriale finalizzata all'implementazione di misure di adattamento e sull'aggiornamento di PAI e PGRA che includano anche scenari di cambiamento climatico per permettere una stima dei possibili scenari di cambiamento su una scala temporale a lungo termine.

3.4 L'ecosistema marino del golfo di Trieste

Cosimo Solidoro, Annalisa Falace, Paola Del Negro - OGS

Introduzione

L'impatto dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini è stato oggetto di numerosi studi a livello nazionale ed internazionale sia per la rapidità con cui si manifestano gli effetti sia per la loro diversità in diverse aree del globo. Tuttavia l'influenza del cambiamento climatico sul mare rimane significativamente meno nota rispetto a quella sugli ecosistemi terrestri. Effettuare osservazioni e sperimentazioni in ambiente marino è logisticamente più complesso ed oneroso rispetto all'ambiente terrestre e la qualità dell'ecosistema terrestre viene maggiormente percepita come importante dall'opinione pubblica e dai portatori di interesse nonostante gli oceani giochino un ruolo fondamentale nello scambio di CO_2 con l'atmosfera e abbiano assorbito buona parte delle emissioni di CO_2 di origine antropica.

I cambiamenti climatici globali influenzano tutti i livelli dell'organizzazione ecologica oltre che la struttura e il funzionamento degli ecosistemi e possono avere effetti diversi se si considerano singole specie piuttosto che popolamenti, su scala di habitat o di ecosistema. Risulta quindi difficile fare previsioni accurate di cambiamenti ecologici futuri e diventa necessario tenere in considerazione che l'enorme varietà di processi e risposte legati ai cambiamenti climatici interagisce con altri disturbi antropici e gli aspetti sinergici che ne derivano sono poco prevedibili e difficili da gestire. Philippart e collaboratori (2011), ad esempio, hanno evidenziato che mari posti alla stessa latitudine possono manifestare risposte differenti ai cambiamenti climatici globali poiché differiscono ampiamente per le caratteristiche abiotiche (profondità, salinità, idrodinamica) e biotiche (biodiversità, rete trofica).

Infatti, l'impatto dei cambiamenti climatici su specifiche componenti ecosistemiche, incluse quelle che possono rivestire un interesse economico, possono essere di tipo diretto (o primario) quando cioè la componente in oggetto è direttamente impattata dai cambiamenti di parametri climatici in senso stretto, (per esempio la temperatura dell'aria, l'umidità, il livello di piovosità) oppure indiretti (o secondari) , quando il cambiamento di uno o più parametri climatici produce un impatto su qualche parametro o componente del sistema che a suo volta ha un effetto sulla componente in oggetto. Esempi di impatti indiretti possono essere: gli impatti su animali che vivono in un certo habitat che viene modificato dal clima e che si nutrono di certe piante che non trovano più le condizioni per proliferare, o predano animali che migrano a causa dei cambiamenti climatici; l'invasione di nuove specie animali che ben si adattano alle nuove condizioni e che competono con le specie autoctone; interferenze con il ciclo riproduttivo causato dal modificarsi dei percorsi o della correnti marine o della fenologia della fioriture microalgali; cambiamenti nei regimi di mescolamento e stratificazione dei mari, che sono causati da cambiamenti nei regimi di vento, pioggia e temperatura e che a loro volta causano modificazioni nella disponibilità di sostanze nutritive nella zona eutrofica (superficiale) e quindi nelle dinamiche biogeochimiche marine.

Negli ecosistemi marini il numero e la tipologia di impatti secondari è molto ampia, e sovente essi coinvolgono molte componenti diverse di un ecosistema, con effetti che si dispiegano su diverse scale spaziali e temporali e risultano quindi particolarmente difficili da osservare.

Inoltre, soprattutto in area costiera gli impatti dei cambiamenti climatici si sovrappongono, come già detto, a quelli di numerosi altri impatti antropici, a volte in maniera sinergica a volte in maniera anti-sinergica, così che diventa difficile identificare con precisione quanta parte del cambiamento cumulato sia prodotta da una singola causa. È altresì vero che lo studio degli impatti cumulati prodotti da cambiamenti climatici e da altri sorgenti di alterazioni ambientali, rimane la finalità ultima di molte valutazioni.

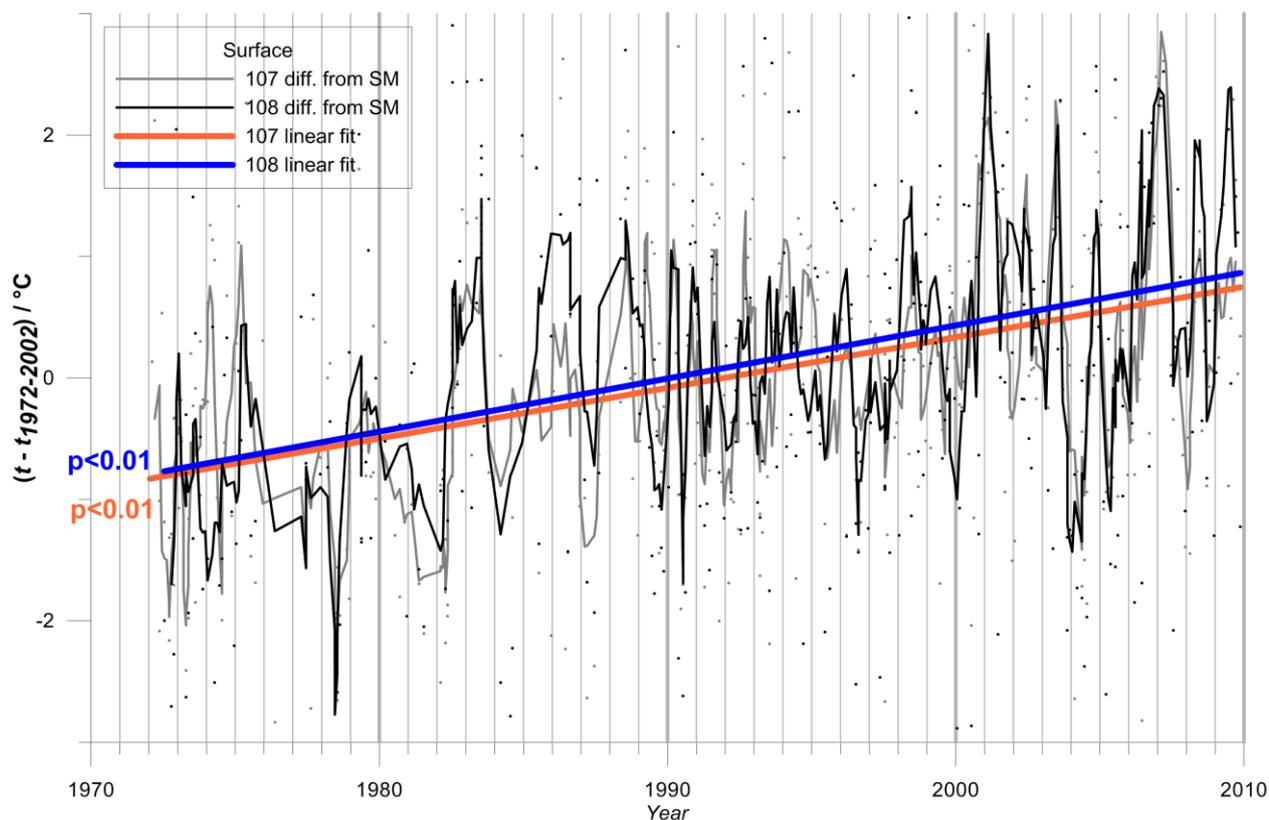
A livello Mediterraneo esistono diversi studi che esplorano gli effetti dei cambiamenti climatici su alcuni organismi di particolare interesse, (Lacoue-Labarthe et al., 2016). Tuttavia il numero di studi specifici sull'impatto in aree costiere è molto più limitato, anche per le complessità di queste aree, ed ancora più limitato è il numero di studi specifici per le acque regionali del Friuli Venezia Giulia.

Fortunatamente la cultura scientifica sul mare sviluppatasi a Trieste a partire dal 1700, ha consentito di poter disporre di molte informazioni sul Golfo di Trieste che, a partire dal 1970, si sono focalizzate su una stazione, denominata C1, posizionata nei pressi dell'Area Marina Protetta di Miramare. Nella stazione C1 sono stati rilevati mensilmente i principali parametri chimico-fisici della colonna d'acqua e raccolti campioni d'acqua e di sedimento per analizzare la composizione dei popolamenti planctonici e bentonici. La disponibilità di informazioni su così lunghe serie temporali ha consentito l'inserimento del sito nella rete internazionale di ricerche ecologiche LTER (Long Term Ecological Research) e ha permesso di valutare le eventuali modificazioni o alterazioni e, laddove possibile, associarle ad alterazioni naturali o antropiche.

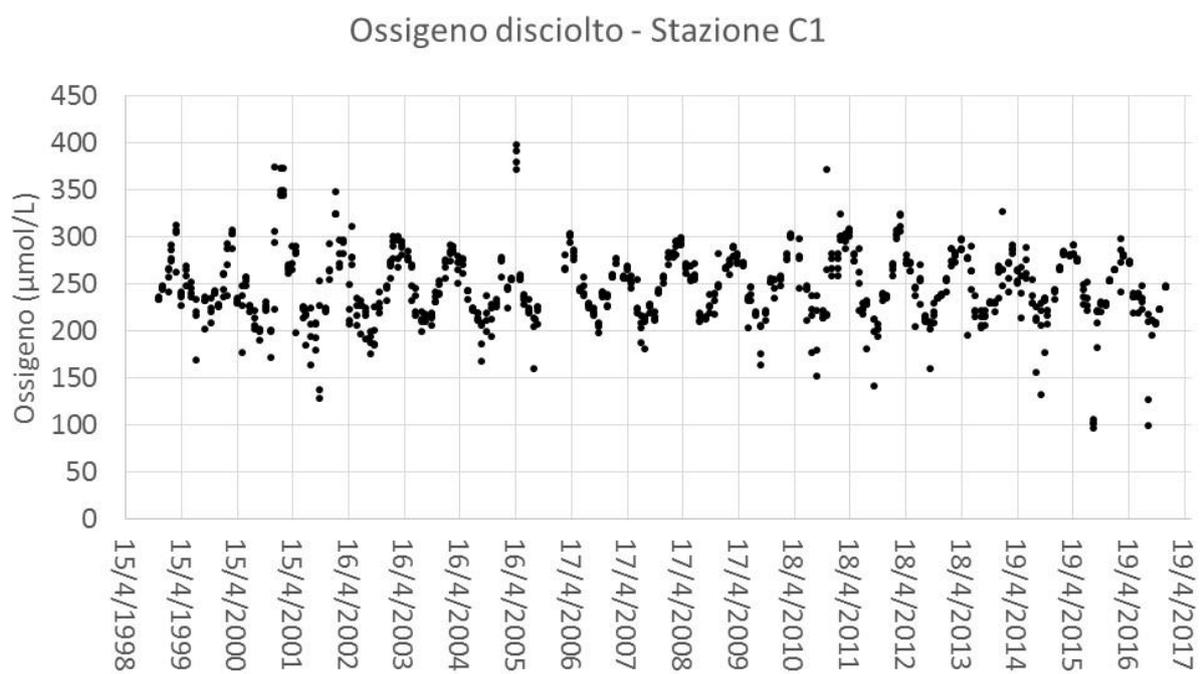
Impatti

Gli effetti dei cambiamenti climatici hanno un impatto sia diretto sia indiretto sulla componente fisica e chimica del sistema marino. Fra gli impatti diretti va primariamente ricordata l'alterazione del flusso di calore all'interfaccia acqua-aria, con conseguente aumento della temperatura superficiale del mare.

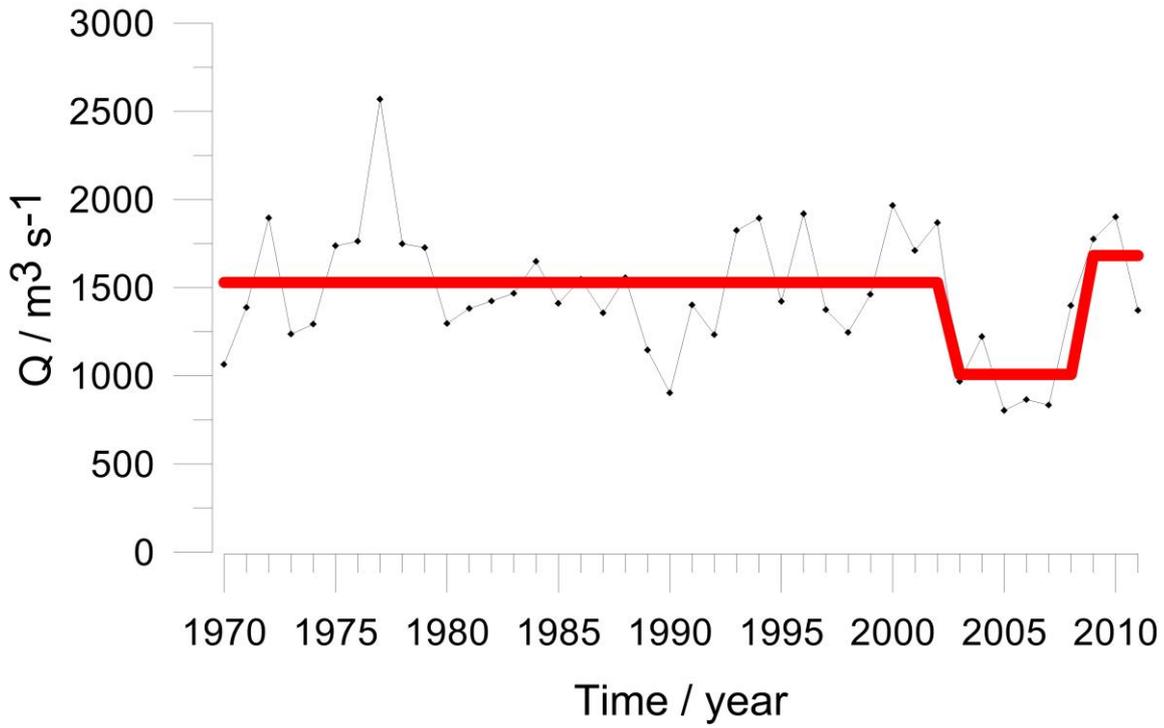
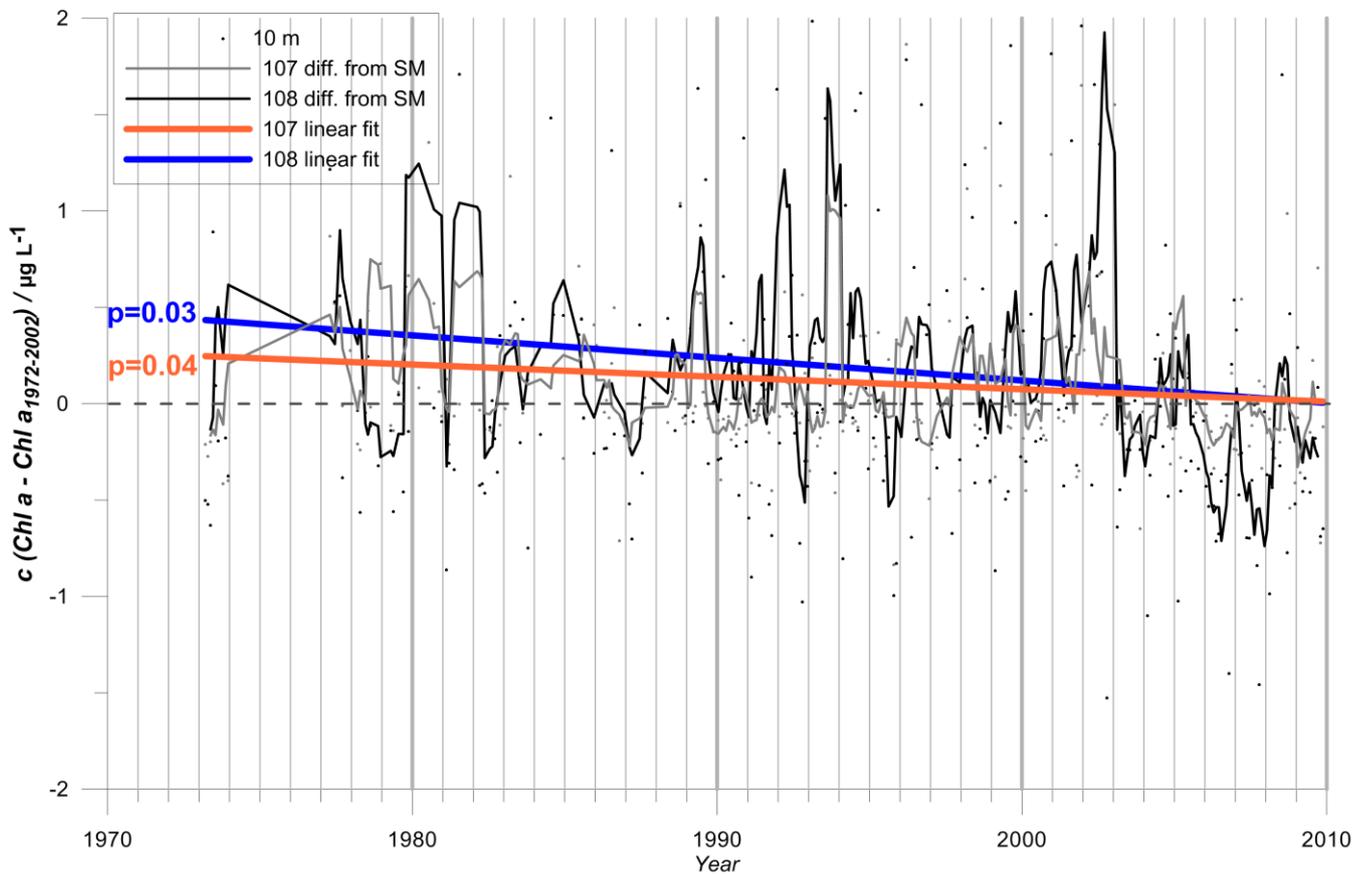
Il confronto tra i dati raccolti nel bacino Adriatico settentrionale nel periodo 1988-1999 con quelli del periodo 1911-1987 ha evidenziato un incremento di più di 5°C (Russo et al., 2002) nella temperatura delle acque superficiali. Le differenze risultano più marcate nella parte occidentale del bacino soprattutto nei periodi invernali e primaverili. Variazioni di temperatura determinano una modificazione della densità dell'acqua ed accentuano la stratificazione, la differenza cioè tra masse d'acqua più o meno dense che si sovrappongono lungo la colonna d'acqua. Una colonna d'acqua stratificata, costituita da acque più dense al fondo e meno dense in superficie, è stabile e il mescolamento della colonna richiede un grande dispendio energetico. I processi di mescolamento, oltre ad influenzare la disponibilità di macronutrienti nella zona eutrofica, incidono anche sulla diffusione dei gas disciolti nell'acqua dalla superficie al fondo, e viceversa. Una forte stratificazione, quindi, limita il livello di ossigenazione delle acque di fondo, favorendo la formazioni di eventi ipossici, quali quelli che si verificano frequentemente in Adriatico settentrionale da metà estate a metà autunno, quando la colonna d'acqua è altamente stratificata, con estensione spaziale e durata molto variabili.

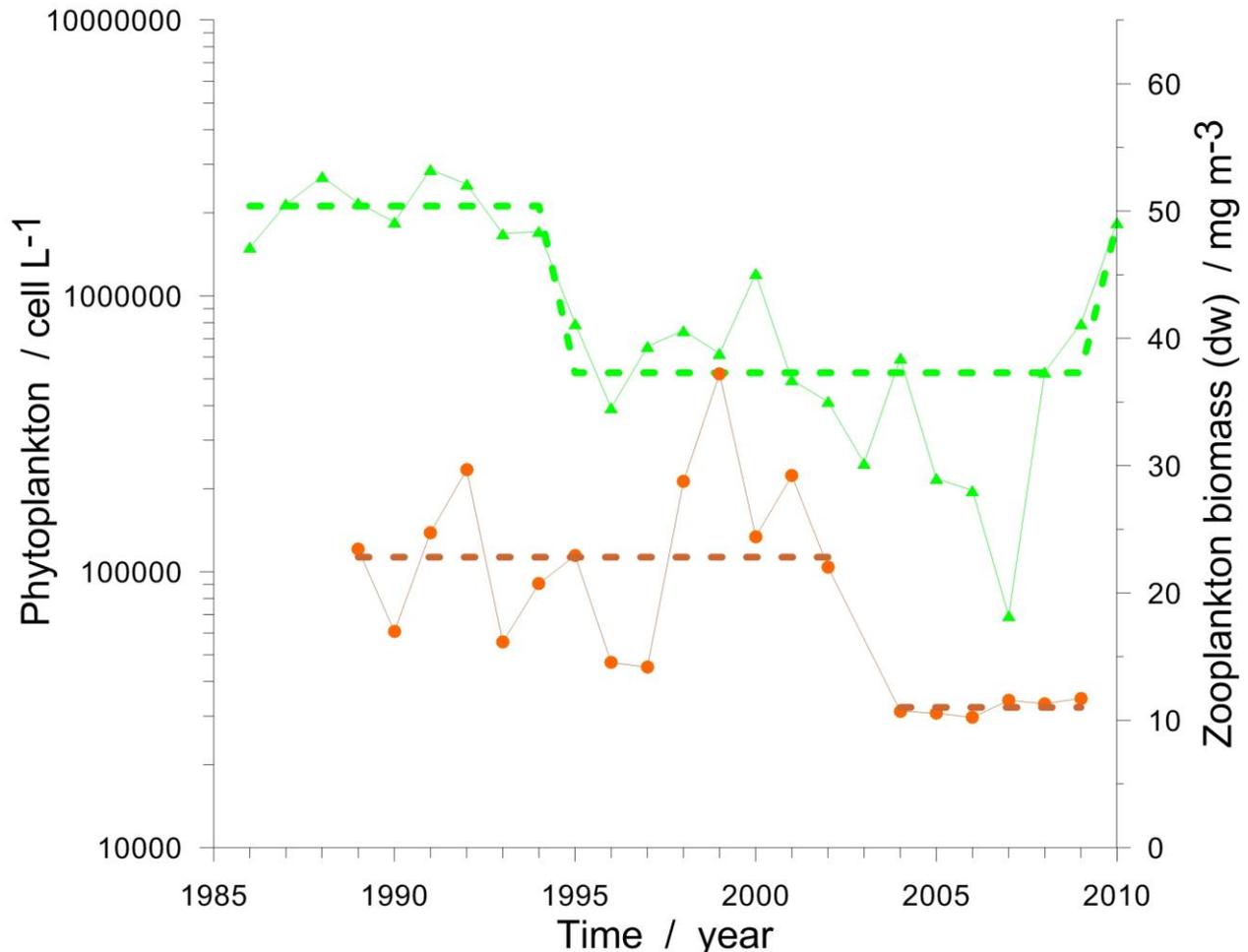
Variazioni multidecadali delle anomalie di temperatura nell'Adriatico settentrionale (Djakovac et al., 2012)

Nell'ottobre-novembre del 1968 e nel maggio 1969 si erano avuti i primi episodi di morie di organismi bentonici lungo le coste dell'Emilia Romagna, fenomeno che diverrà una costante della zona a partire dal 1975 fino alla fine degli anni '80. L'anossia verificatasi nell'ottobre-novembre 1977 nel Golfo di Venezia con estese morie di pesci ed altri organismi bentonici è apparsa poi come la testimonianza più eclatante delle dimensioni sistemiche del fenomeno.

Per determinare i meccanismi dei cambiamenti nella frequenza dell'ipossia e la loro relazione con le condizioni ambientali, sono state analizzate numerose serie storiche di dati relativi alla concentrazione di ossigeno disciolto associate a parametri che descrivono l'influenza dell'acqua dolce, i processi di stratificazione e gli schemi di circolazione. È stato dimostrato che gli eventi ipossici stagionali coincidevano con la formazione di cellule di circolazione ciclonica o anticiclonica (Djakovac et al, 2015) a conferma dell'importante associazione tra la dinamica oceanografica e la comparsa di eventi anomali. L'ossigenazione delle acque di fondo durante il periodo agosto-novembre degli ultimi due decenni è, in generale, aumentata mentre è stata osservata una tendenza decrescente nelle acque superficiali. La frequenza degli eventi ipossici nel bacino Adriatico settentrionale è diminuita dal 1992 tuttavia, la frequenza di eventi ipossici nel Golfo di Trieste sembra essere aumentata negli ultimi anni.

Concentrazione di Ossigeno disciolto nelle acque della stazione C1 (Sito LTER) - Kralj et al. 2017

Le osservazioni sperimentali evidenziano come in nord Adriatico, all'incremento di temperatura si sia associato un incremento della salinità superficiale, relazionato alla diminuzione degli apporti di acque dolci (Cozzi e Giani, 2011) e all'incremento degli apporti di acque meridionali (Malacic et al., 2006; Solidoro et al., 2009). L'intensificazione degli eventi climatici che determinano l'aumento della frequenza e severità dei fenomeni estremi, quali tempeste, piogge intense, ondate di calore (Solomon et al., 2007; Hoegh-Guldberg e Bruno, 2010) e la modificazione del regime di pioggia hanno conseguentemente modificato gli apporti fluviali al mare. Il flusso medio annuo delle acque del fiume Po, ad esempio, ha subito una drastica riduzione dal 2003 al 2009 a seguito di una prolungata siccità, estremamente più marcata rispetto a quanto rilevato negli anni '40 (Zanchettin et al., 2008).

Oltre ad una variazione degli apporti fluviali di acqua dolce si è inoltre registrata una variazione del carico di sostanze nutritive portate dai fiumi, sia come conseguenza diretta della riduzione di apporti fluviali, sia per un diverso uso del territorio e per l'introduzione di norme ambientali specificatamente volte a ridurre l'eutrofizzazione, quali il bando del fosforo dai detersivi (Solidoro et al. 2009, Cozzi et al., 2012). La conseguenza più diretta è stata la diminuzione della concentrazione di clorofilla, indicazione della riduzione della biomassa fitoplanctonica (Mozetic et al., 2012).

Variazione multidecadale della portata media del fiume Po (Giani et al., 2012)

Anomalie multidecadali della concentrazione di Clorofilla a (Giani et al., 2012)

L'analisi delle lunghe serie temporali di dati raccolti nella stazione C1 del Golfo di Trieste evidenzia modificazioni significative della biomassa e della composizione del fitoplancton. Uno shift nelle abbondanze risulta evidente nel 1993-94 dovuto principalmente a un drastico decremento dei fitoflagellati mentre a partire dal 2009 le abbondanze sembrano essere in ripresa. Alle modificazioni di biomassa si associa una variazione composizionale: diminuiscono le fioriture a diatomee e prevalgono gli organismi di piccole dimensioni (Mozetic et al., 2012).

Variazioni delle abbondanze medie annuali di fitoplancton (triangoli) e biomassa di zooplancton (cerchi) nel Golfo di Trieste (Cabrini et al., 2012; Mozetič et al., 2012)

Anche la componente microzooplanctonica modifica la propria composizione nel tempo nel periodo 1986-2010 con una drastica riduzione dei tintinnidi aloricati (Monti et al., 2012).

Relativamente allo zooplancton di maggiori dimensioni (mesozooplancton), Kamburska e Fonda (2006) e Conversi et al. (2009), analizzando 30 anni di dati, osservano una diminuzione della componente a cladoceri e un incremento dei copepodi e, in particolare di specie "calde". Gli autori associano queste informazioni al generale incremento di temperatura e alla diminuzione delle concentrazioni di nutrienti.

Un importante lavoro di Fuks et al. (2012) integra queste informazioni evidenziando come la rete trofica si sia modificata passando dal modello classico di rete del pascolo al modello di rete microbica, con una prevalenza cioè di organismi di piccole dimensioni. La rete trofica classica si innesterebbe soltanto quando si verifica un importante input di nutrienti secondo quanto sostenuto da Solidoro et al. (2007), Fonda et al. (2007) e Cossarini et al. (2012).

Le comunità bentoniche che hanno sofferto gli episodi di anossia degli anni '80 (Orel et al., 1993) si sono riorganizzate modificando la struttura della comunità con una diminuzione dei policheti e un incremento dei molluschi (Giani et al., 2012). Anche la componente vegetale, si è notevolmente ristrutturata in termini di diversità floristica e di associazione algale dominante caratterizzata dall'assenza di comunità ben strutturate. La composizione floristica vede una forte riduzione delle Fucales che diminuiscono di più del 20% rispetto a quanto osservato negli anni '70. Questa riduzione comporta una maggior uniformità nella vegetazione dominata da tappeti di Gelidium, Gelidiella e Pterosiphonia (Falace et al., 2010).

Per quanto riguarda il comparto ittico si può osservare come le modificazioni nell'abbondanza e nella composizione degli stock sia il risultato di impatti diversi che vanno dalla sovrapesca, dall'uso di tecnologie sempre più evolute, alla modifica del mercato per concludersi con gli effetti ambientali. E' importante sottolineare comunque che le variazioni di temperatura possono contribuire significativamente dando spazio a specie affini ai climi caldi, come prevista da studi modellistici (Libralato et al. 2015) e corroborata da osservazioni sperimentali (Dulcic et al., 2004; Azzurro et al., 2011). Albouy et al. (2010, 2012) prevedono che un quinto circa delle specie indigene e native scompariranno, e che a tali modificazioni si sovrapporanno quelle dovute a migrazioni interne al bacino causate da cambiamenti nei regimi di temperatura.

I cambiamenti ambientali influenzano quindi processi ecologici importanti come la dispersione larvale, il successo della sopravvivenza della progenie, la struttura e composizione delle comunità e avranno importanti effetti sugli organismi che oltre ad essere vulnerabili al riscaldamento sono sessili o hanno mobilità ridotta, quali i coralli, ma anche i bivalvi. In questo caso, oltre agli effetti prodotti dall'aumento della temperatura media è importante considerare gli effetti causati dall'occorrenza di eventi estremi. Se infatti gli organismi dotati di alta mobilità possono in qualche misura limitare, spostandosi, gli effetti di eventi intensi ma impulsivi, questa possibilità è preclusa agli organismi che non si possono muovere. In questo contesto, uno studio specifico sul Mediterraneo (Galli et al., 2016) prevede che nelle prossime decadi le ondate di calore marine, definite come eventi prolungati di temperatura particolarmente elevata, si presenteranno più frequentemente, saranno più intense e penetreranno più in profondità. Lo studio prevede che tali eventi ridurranno ulteriormente l'estensione dei banchi di corallo rosso più superficiali e, più generalmente, di tutte le comunità a coralligeno. Lo studio evidenzia inoltre come tali eventi avranno un effetto significativo anche su tutte le attività di acquacoltura, ed in particolare di molluschicoltura, che avvengono lungo le coste mediterranee. Questa conclusione è quindi di interesse anche per le molluschicolture delle acque costiere del Friuli Venezia Giulia.

Un altro effetto diretto dei cambiamenti climatici è il fenomeno comunemente noto con il nome di acidificazione oceanica. L'aumento di concentrazione di diossido di carbonio (CO_2) in atmosfera causa infatti un aumento della quantità di CO_2 solubile in acqua e, conseguentemente, della concentrazioni di acido carbonico in acqua, con conseguente aumento della concentrazione di ioni idrogenioni in mare. L'acidificazione marina è un processo forse meno noto del riscaldamento oceanico, ma non per questo meno rilevante. Si ritiene infatti che la acidificazione possa avere un effetto molto rilevante non solo su tutti gli organismi dotati si di una struttura carbonatica (fra questi i coralli, echinodermi, alcune specie di plancton), ma anche su molti altri organismi, andando ad interferire con diversi processi metabolici (Zunino et al., 2017). E' altresì ragionevole che, anche laddove un organismo riuscisse a compensare gli effetti negativi prodotti da un aumento di acidificazione nel mezzo in cui vive, tale operazione indurrebbe un costo energetico ed uno stress tali da renderlo più vulnerabile agli effetti di altri stressori. In letteratura infatti viene sovente enfatizzato come gli effetti di riscaldamento ed acidificazioni si amplifichino a vicenda, così che l'impatto dell'acidificazione su, ad esempio i mitili mediterranei sia più rilevante alle alte temperature che alle basse (Gazeau et al., 2007)

3.5 Colture economicamente rilevanti

Francesco Danuso[1], Dario Giaiotti[2,3], Filippo Giorgi[4], Michele Zuppichin[2]
[1] Università degli Studi di Udine
[2] Università degli Studi di Trieste
[3] ARPA FVG
[4] ICTP

In questo lavoro si presenta una metodologia che, utilizzando sinergicamente modelli che sono stati sviluppati in specifici ambiti scientifici, permette di eseguire simulazioni di sistemi naturali complessi. L'applicazione del metodo ha per oggetto lo sviluppo e la produttività di piante in condizioni meteorologiche che evolvono negli anni, tenendo conto dei cambiamenti climatici. Alcune proiezioni degli impatti di possibili scenari climatici futuri sul mais e sulla vite vengono portati come esempio.

Sintesi

I cambiamenti climatici in atto a livello globale hanno delle ripercussioni a livello locale. In particolare le attività agricole sono evidentemente esposte alle variazioni delle condizioni atmosferiche in cui i vegetali cresceranno e si svilupperanno.

A partire dagli scenari climatici per l'intero XXI secolo, generati tramite modelli atmosferici, sono stati valutati gli impatti su alcune colture economicamente rilevanti per la regione Friuli Venezia Giulia: il mais e la vite.

Gli impatti sono stati realizzati per mezzo di modelli colturali, sviluppati dall'Università di Udine, che prendono in considerazione anche le proprietà del terreno e l'irrigazione.

I risultati mostrano che gli impatti si collocano entro un intervallo di possibilità, che dipendono dal tipo di scenario climatico futuro: RCP8.5, di sicuro e considerevole riscaldamento, e RCP2.6, di moderato innalzamento delle temperatura media del pianeta.

Per il mais, sino alla fine del secolo e nel caso RCP2.6, la produzione è stimata rimanere invariata, o perfino leggermente aumentare per alcuni tipi di terreni. Invece nel caso RCP8.5 la produzione diminuirà sistematicamente, nonostante l'aumento delle irrigazioni richieste per evitare eccessivo stress alle piante.

Per la vite, in caso di moderato aumento delle temperature, tutte le fasi fenologiche manterranno l'attuale calendario annuale. Al contrario, nell'eventualità dello scenario RCP8.5, è atteso un progressivo arretramento delle date corrispondenti agli stadi evolutivi delle piante e dei frutti, con anticipi prossimi ad un mese per la fine del secolo.

Evidenze attuali

Il ciclo vitale delle piante è determinato dalle caratteristiche fisiologiche dell'insieme di individui considerati e dalle condizioni ambientali in cui essi vivono. Nello specifico, l'ambiente è determinato dalla radiazione solare, dalla temperatura e composizione dell'aria, dalle precipitazioni e dal vento, oltre dalle peculiarità fisiche e chimiche del terreno. Le informazioni su quest'ultimo sono fondamentalmente prodotte tramite campagne di misura e telerilevamenti recenti (ERSA-SIP, 2017) ed è verosimile che non subiranno variazioni significative negli anni a venire, tali da essere considerate variabili per la modellazione fenologica.

L'atmosfera, invece, è la condizione ambientale che sta evolvendo di decennio in decennio e che continuerà a farlo in modo percepibile anche dalla vegetazione. Inoltre, attualmente nella regione Friuli Venezia Giulia, l'agricoltura utilizza tempi e modi di semina, fertilizzazione e irrigazione che sono scanditi dalle fasi fenologiche che in questo esperimento modellistico sono state considerate quelle che verranno applicate anche in futuro.

Variazioni verosimili dei tempi fenologici imputabili ai cambiamenti climatici sono già state osservate su alcuni tipi vegetali (CNV, 2010) e semplici modelli concettuali inducono ad ipotizzare che queste osservazioni siano solo le prime fasi di un'evoluzione, che proseguirà con evidenze progressivamente più robuste nel corso del XXI secolo.

Metodologia

Le conoscenze sulla fisiologia delle piante di principale interesse economico sono molto approfondite (FAO, 2017) ed hanno portato allo sviluppo di modelli che ne simulano le fasi fenologiche con un'accuratezza utile alla programmazione colturale (Rocca e Danuso, 2011) e (Danuso e Rocca, 2014).

L'evoluzione più attendibile delle condizioni meteorologiche fino alla fine del XXI secolo, con risoluzione temporale giornaliera, per le principali grandezze atmosferiche, nei pressi della superficie terrestre, attualmente viene simulata da modelli climatici deterministici. In particolare la risoluzione spaziale raggiunta tramite tecniche computazionali ad area limitata è di 10 km circa.

I modelli climatici ad area limitata, detti anche modelli climatici regionali, descrivono l'evoluzione della dinamica e della termodinamica atmosferica solo su una parte geograficamente limitata della Terra, utilizzando simulazioni climatiche planetarie come condizioni al contorno dell'area di interesse. Con questo approccio, è possibile contestualizzare su specifiche aree del globo quanto previsto tramite modelli di circolazione atmosferica globale, i quali generano scenari di cambiamenti climatici su scala planetaria. I modelli planetari tengono conto delle interazioni tra radiazione solare, superficie terrestre, oceano, atmosfera e attività antropiche, con relative retroazioni (*feedback*), ovvero di tutti gli elementi che determinano il clima della Terra.

Utilizzando queste due eccellenze modellistiche, si è sperimentato l'accoppiamento della modellistica dei cambiamenti climatici ad area limitata con la modellistica fenologica, così giungendo agli impatti dei cambiamenti climatici sulle fasi fenologiche e produttive di alcune piante rilevanti per l'economia regionale.

Le piante considerate sono il mais (*Zea mays*) e la vite (*Vitis vinifera*), le quali, nella regione Friuli Venezia Giulia, costituiscono una porzione importante delle attività primarie (ISTAT-RAFVG, 2013) e coprono una buona parte del mercato agricolo regionale (CGA6, 2013). La metodologia può essere estesa anche ad altre colture, ma richiede un'appropriata destinazione di risorse umane e computazionali necessarie per la trattazione di tutto il panorama agricolo regionale.

L'aspetto innovativo di questo approccio modellistico risiede nel superamento di alcuni limiti impliciti nell'utilizzo disgiunto della modellistica atmosferica e di quella colturale. Infatti, sovente le comunità di ricercatori, che focalizzano i propri sforzi sulla modellazione della crescita dei vegetali e della loro resa produttiva, alimentano i modelli colturali con determinanti atmosferici estratti dalle misure meteorologiche o climatiche, che sono considerate rappresentative delle zone a cui si riferiscono le simulazioni.

Tali informazioni meteorologiche sono limitate per quanto riguarda l'evoluzione futura del clima. Infatti nel caso si trattino le fluttuazioni stagionali e giornaliere future come riproduzioni stocastiche del clima attuale, o di quello del passato, non è possibile rappresentare verosimilmente gli effetti prodotti sull'atmosfera terrestre dalle forzanti non periodiche. Tra queste forzanti vi sono quelle antropiche, delle quali esistono evidenze osservative di trend non lineari, che però non sono presenti nelle misure utilizzate per la generazione di serie stocastiche, visto che le misure si riferiscono al clima passato e non a quello futuro. Inoltre l'utilizzo di misure sito specifiche, come guida nella generazione stocastica di proiezioni future, non produce serie temporali di variabili meteorologiche correlate spazialmente, come invece accade in realtà, data la natura tridimensionale dei campi meteorologici.

Invece, le simulazioni numeriche deterministiche del clima futuro, su aree limitate del pianeta, sono guidate dal segnale del mutamento globale, che tiene conto anche degli effetti antropici, considerando scenari evolutivi di aumento delle pressioni ambientali, che sono funzione delle politiche gestionali delle risorse naturali e dell'inquinamento ambientale. Certamente, il dettaglio spaziale e temporale della modellistica climatica numerica non è sufficiente a riprodurre le peculiarità meteorologiche di specifici siti, di cui tra l'altro la regione Friuli Venezia

Giulia è ricca. Queste caratteristiche locali sono determinate da particolari condizioni al contorno, quali i dettagli orografici e l'uso del suolo, solo per citarne i più intuitivi. Tali singolarità, che sono tipiche della microscala meteorologica ed interessano prevalentemente lo strato limite atmosferico (AMS-GLOS, 2017), allo stato attuale dello sviluppo della modellistica climatica, sono ancora insufficientemente aderenti alla realtà.

Nel caso degli impatti trattati in questo lavoro, considerate le caratteristiche ambientali delle aree geografiche su cui vi sono le colture, la meteorologia prevista per il prossimi cent'anni dai modelli numerici è considerata adeguata allo scopo.

D'altro canto, ricerche prevalentemente orientate agli aspetti atmosferici del sistema clima (Ruddiman, 2013), tendono a trasferire i risultati delle simulazioni alle valutazioni di impatti sulle culture, utilizzando squisitamente informazioni di natura meteorologica. Per lo scopo solitamente vengono adottate relazioni empiriche tra parametri atmosferici e stati fenologici dei vegetali. In questo modo sono trascurate la dipendenza della crescita e delle situazioni di stress delle piante dalle caratteristiche del suolo e dalle risposte fisiologiche degli esseri viventi a tutte le condizioni ambientali.

Adottando l'approccio integrato, invece, le simulazioni numeriche, sullo stato atmosferico futuro nei pressi del suolo della pianura regionale, sono state estratte dalla base dati EURO-CORDEX (Benestad, 2017) (EU-CORDEX, 2017) e sono state utilizzate per alimentare il modello colturale miniCSS (Rocca e Danuso, 2011). In questo modo sono state realizzate proiezioni sulla produttività e le necessità irrigue del mais. Inoltre, a partire dalle stesse proiezioni climatiche, sono state calcolate le tempistiche delle fasi fenologiche di un vitigno diffuso in regione, il Friulano che viene anche comunemente chiamato Tocai friulano, ed il rischio di gelate tardive potenzialmente dannose per i vigneti di quella varietà.

Allo scopo di fornire al modello colturale informazioni pedologiche che rappresentassero la variabilità della pianura friulana, sono state impiegate le misure, ad alta risoluzione spaziale, raccolte in campagne di rilevamento eseguite nella zona di transizione tra l'alta pianura e la zona delle risorgive; nello specifico il territorio di Zoppola, in provincia di Pordenone (Danuso et al., 1998) (Danuso et al., 1999). Questa scelta permette di considerare le differenti risposte delle colture alle sollecitazioni indotte dai cambiamenti climatici, su terreni aventi diversa percolazione, ovvero capacità di trattenere l'acqua.

Per valutare la propagazione delle incertezze dei forzanti meteorologici agli impatti, sono state considerate più serie temporali giornaliere. Le serie temporali meteorologiche corrispondono alle simulazioni eseguite da ciascuno dei cinque modelli che sono stati scelti per gli scopi della stesura di questo rapporto, estraendoli dal database EURO-CORDEX. Per i criteri usati nella scelta dei modelli, si rimanda alla sezione introduttiva di questo rapporto. Inoltre, sono stati individuati due gruppi di serie, ciascuno di cinque simulazioni: uno riguardante l'ipotesi di riscaldamento globale più moderato, indicato con la sigla RCP2.6; l'altro associato allo scenario di riscaldamento peggiore, cioè il RCP8.5. Le serie di temperatura media, minima, massima, precipitazione radiazione solare, pressione atmosferica e intensità media del vento, nei pressi della superficie terrestre, coprono con continuità il periodo che va dal 2006 fino alla fine dell'anno 2100.

Ciascuna serie temporale ha alimentato il modello colturale miniCSS, generando un insieme di informazioni colturali sito e scenario climatico dipendenti. Tra le informazioni prodotte vi sono la produttività annua di granella di mais ed il volume d'acqua richiesto nel complesso dalle irrigazioni necessarie per evitare alla pianta l'occorrenza di stress. Le informazioni sono state sintetizzate per produrre degli scenari di impatto e i risultati sono presentati nella prossima sezione.

Impatti futuri

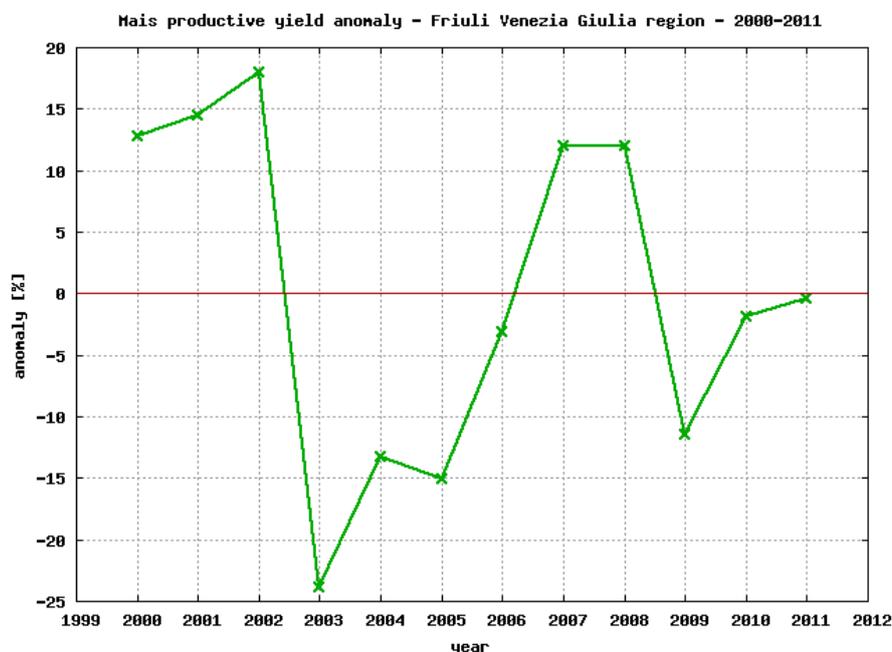
Zea mays

Le simulazioni di impatti, riguardanti la resa produttiva del mais e la richiesta idrica di tale coltivazione, vengono presentate nel seguito tramite dei grafici, che sono serie temporali corrispondenti al tipo di suolo utilizzato nella simulazione. Sono stati scelti tre tipi di terreno, le cui caratteristiche pedologiche derivano dalla base dati realizzata nel comune di Zoppola (PN). Nello specifico si tratta dei terreni aventi diversi valori di percolazione: il tipo altamente drenate, contraddistinto dal codice UWR1, il tipo con elevata ritenzione idrica, che viene indicato con la sigla UWR3, ed infine il tipo a percolazione intermedia che è lo UWR2.

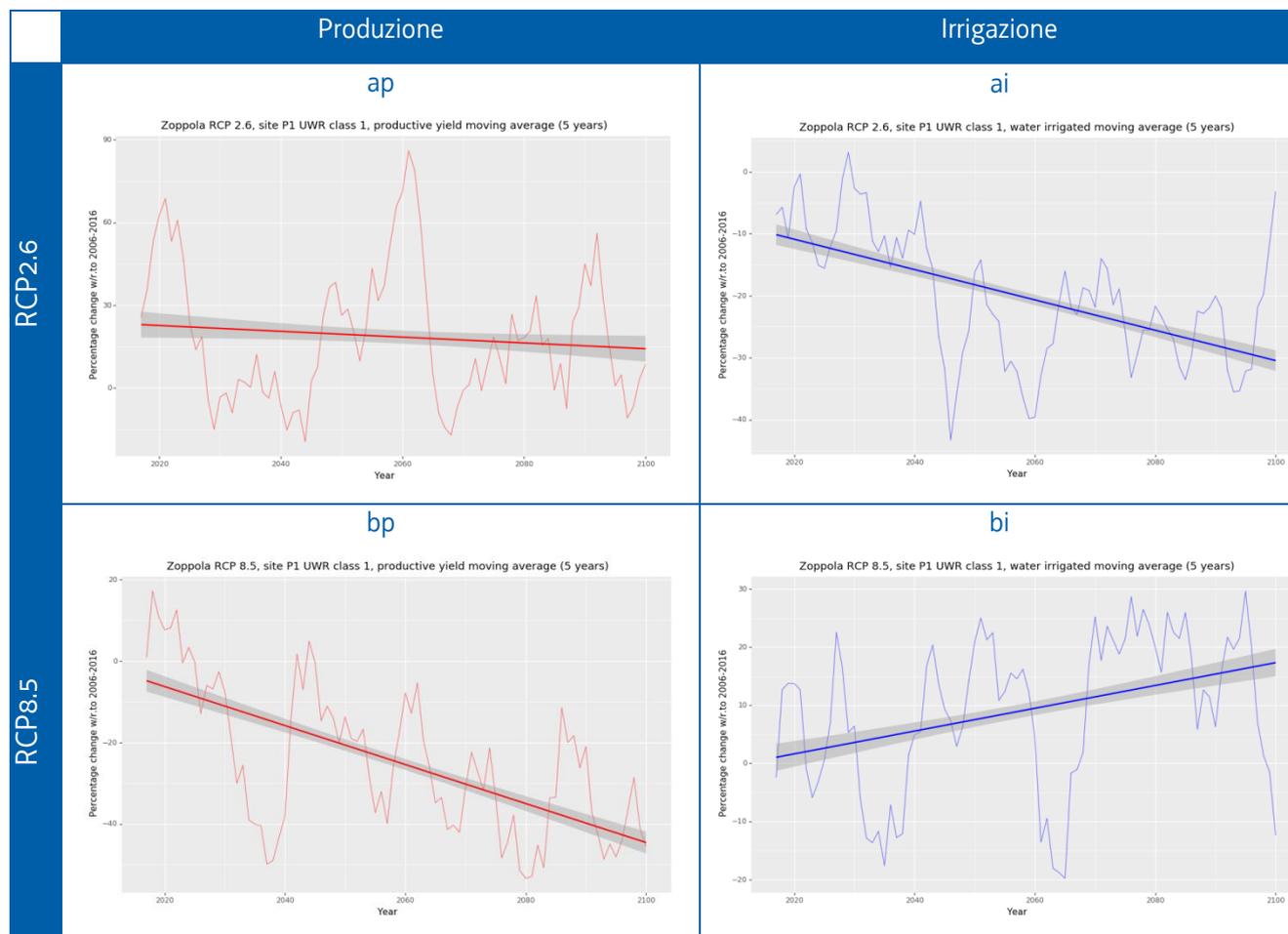
Le serie temporali meteorologiche simulate per diversi punti geografici, appartenenti alle tre classi di percolazione, sono state impiegate nell'alimentazione del modello miniCSS. I risultati ottenuti sono simili all'interno di ciascuna classe. Gli impatti sono presentati come media di ensemble, ovvero la media delle cinque simulazioni colturali realizzate a partire dalle serie meteorologiche dei cinque modelli, che sono stati scelti per descrivere l'incertezza di ciascuno dei due scenari: RCP2.6 e RCP8.5.

In tutti i grafici che seguono, la serie temporale si estende sino alla fine del secolo e la produzione annuale, oppure la quantità di acqua richiesta dalla coltivazione, viene espressa come variazione percentuale rispetto ai quantitativi medi calcolati sul periodo 2006-2016. Nel dettaglio, il valore simulato per ciascun anno viene sottratto al corrispondente valore medio del periodo di riferimento e la differenza ottenuta è divisa per il valore medio del riferimento e moltiplicata per 100. Pertanto i grafici mostrano gli impatti come variazioni relative in funzione del tempo. Una media mobile, su cinque anni, applicata all'intera serie temporale rende più chiare le tendenze sistematiche nel tempo. Inoltre, ai grafici viene sovrapposta la retta di regressione, con la relativa area corrispondente all'intervallo di confidenza del 95%. La significatività delle rette di regressione è bassa in molti casi, ma lo scopo di tali rette è semplicemente quello di indicare al lettore la presenza di un'eventuale trend e non quello di fornire una funzione quantitativa degli impatti. Si noti che la fluttuazione annuale è rilevante, anche dopo l'operazione di filtraggio eseguita con la media mobile di 5 anni.

Come termine di paragone per l'ampiezza delle anomalie produttive future, si consideri la medesima grandezza calcolata per il periodo 2000-2011, a partire dai dati di produzione di mais per ettaro in Friuli Venezia Giulia; fonte ISTAT (ISTAT, 2017). Nel periodo considerato la produzione di mais è oscillata rispetto alla media in un intervallo del 20% , vedasi fig. 3.5.1. Va ricordato che il 2003 è stato caratterizzato da un estate estremamente calda e siccitosa. Pertanto, variazioni interannuali comprese entro il venti per cento rispetto ai valori medi decadali sono da considerare normali per gli standard produttivi attuali.

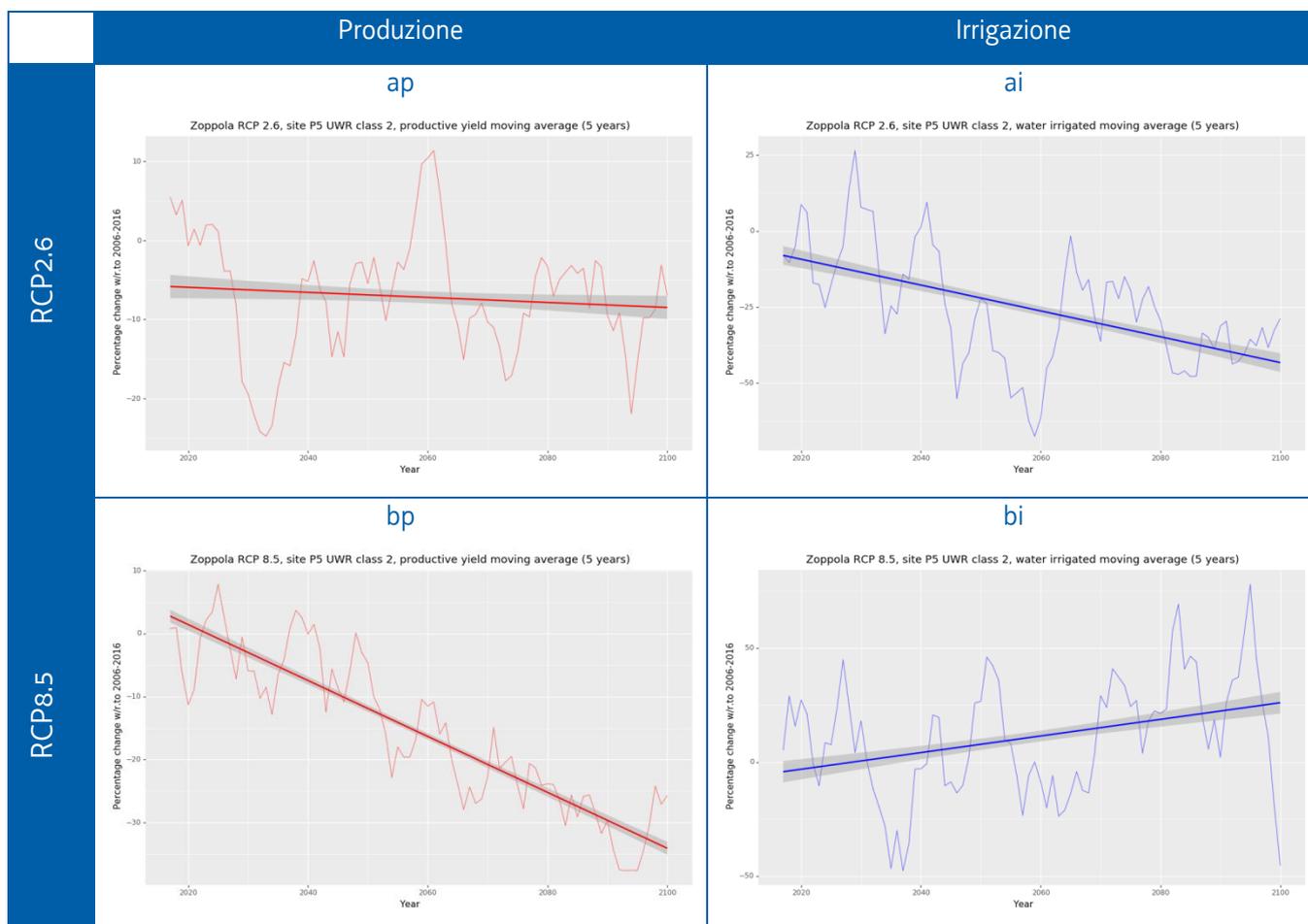
fig. 3.5.1 – anomalie annuali di produzione del mais, calcolate dai rapporti massa/ettaro, espresse in variazione percentuale rispetto alla media del periodo 2000-2011. Fonte dati ISTAT (ISTAT, 2017). Si noti che di anno in anno vi sono significative variazioni che, per il periodo considerato, sono comprese entro il 20% circa. Estrema è la perdita produttiva nell'anno 2003, di circa ¼ rispetto alla media, nel quale la primavera e l'estate sono stati particolarmente caldi e siccitosi.

Esaminiamo ora i risultati, raggruppandoli per tipo di terreno, e commentando gli impatti prodotti da ciascun scenario futuro di cambiamento climatico.

Combinando la proiezione sulla produzione con quella della richiesta idrica, si deduce che, nello scenario RCP2.6, le condizioni di coltivazione del mais, sui terrenti di tipo UWR1, diventeranno più favorevoli rispetto a quelle occorse nel periodo 2006-2016. Infatti tale scenario prevede un aumento della temperatura media estiva fino ad un massimo di circa 1.5 °C al 2040, per poi assestarsi attorno ad un solo grado fino alla fine del secolo; si veda fig. 3.5.5at. Per quanto riguarda le precipitazioni, lo scenario RCP2.6 indica un aumento delle precipitazioni estive, evidente a partire dal 2040, fino al 10% in più rispetto ai valori climatici di riferimento, ovvero al clima attuale; fig. 3.5.5ar. Questa concomitanza di maggior disponibilità di precipitazioni estive e di contenuto aumento della temperatura media è interpretabile come un miglioramento delle condizioni di crescita e sviluppo del mais, a parità di disponibilità di nutrienti nel terreno. Schematicamente si può sintetizzare il miglioramento ambientale come una diminuzione dello stress per evapotraspirazione ed un mantenimento, o perfino un miglioramento, delle condizioni termiche favorevoli allo sviluppo della pianta, vedi fig. 3.5.6a.

fig. 3.5.2 – Impatti dei cambiamenti climatici sulla coltivazione del mais (*Zea Mmays*) su terrenti di tipo UWR1, ovvero ad elevata percolazione. Le serie temporali mostrano la media mobile, su 5 anni, delle variazioni percentuali, rispetto al periodo di riferimento 2006-2016, di produzione massa/ettaro per lo scenario RCP2.6 (ap) e per lo scenario RCP8.5 (bp); di irrigazione volume/ettaro per lo scenario RCP2.6 (ai) e per lo scenario RCP8.5 (bi). Le rette di regressione lineare sono riportate con la fascia scura indicante l'area del grafico con livello di confidenza del 95%.

Esaminando le proiezioni riguardanti lo scenario RCP8.5, invece, la produzione ha un progressivo calo durante tutto il periodo simulato. Rispetto ai valori attuali, la diminuzione delle rese è del 20% circa a metà secolo e raggiunge il 40% verso il 2100, fig. 3.5.2bp. Le esigenze di acqua necessarie a ridurre lo stress delle piante sono previste aumentare, specie nella seconda parte del XXI secolo, tanto che dopo il 2070 il surplus richiesto rispetto al periodo di riferimento è mediamente del 20%, fig. 3.5.2bi. Questi risultati sono interpretabili alla luce delle curve di stress del mais che sono presentate nella fig. 3.5.6b. Infatti l'aumento non lineare, delle temperature medie estive, previste dallo scenario RCP8.5, vedi fig. 3.5.5bt, porta ad un incremento anche di 4 °C della temperatura media giornaliera nella seconda parte del secolo. Questo fatto rende le condizioni ambientali ancora termicamente adatte alla crescita del mais, ma ne aumenta decisamente l'evapotraspirazione. Tenuto conto che la diminuzione delle precipitazioni estive, vedi fig. 3.5.5 br, produrrà nei vegetali condizioni di stress per periodi sempre più prolungati della loro vita, a cui si dovrà far fronte con l'irrigazione, si deduce che lo scenario RCP8.5 è decisamente sfavorevole alla coltivazione del mais, per lo meno mantenendo le pratiche colturali attuali.

Per i terreni a media percolazione, indicati con il codice UWR2, che hanno una discreta capacità di trattenere l'acqua, l'impatto previsto applicando le forzanti atmosferiche dello scenario RCP2.6 è analogo a quello descritto per i terreni di tipo UWR1, per quanto riguarda le tendenze. Invece, la produzione è soggetta a fluttuazioni meno ampie rispetto a quelle simulate su terreni molto drenanti. Si veda la fig. 3.5.3ap, che si riferisce ad un sito la cui produzione attuale è mediamente inferiore del 10% rispetto a quella presa come riferimento. Venendo alle necessità idriche, dalla fig. 3.5.3ai si nota che lo scenario prevede l'uso di volumi d'acqua minori con un trend che conduce al 40% in meno dell'acqua attualmente impiegata. Quindi anche per i terreni di tipo UWR2, la modellistica integrata indica che ci saranno le condizioni favorevoli alla coltivazione del mais, se l'evoluzione climatica è quella dello scenario RCP2.6.

Lo scenario RCP8.5 produce sui siti pedologici di tipo UWR2 una diminuzione progressiva della produzione durante tutto il secolo. Si veda fig. 3.5.3bp, dove il minimo viene raggiunto a fine secolo ed è del 30%. L'irrigazione richiesta per la coltivazione aumenta, specialmente nelle seconda metà del secolo, attestandosi al 25% di acqua in più, necessaria a compensare la carenza di precipitazioni, fig. 3.5.3bi.

fig. 3.5.3 – Impatti dei cambiamenti climatici sulla coltivazione del mais (*Zea mays*) su terreni di tipo UWR2, ovvero a media percolazione. Le serie temporali mostrano la media mobile, su 5 anni, delle variazioni percentuali, rispetto al periodo di riferimento 2006-2016, di produzione massa/ettaro per lo scenario RCP2.6 (ap) e per lo scenario RCP8.5 (bp), di irrigazione volume/ettaro per lo scenario RCP2.6 (ai) e per lo scenario RCP8.5 (bi). Le rette di regressione lineare sono riportate con la fascia scura indicante l'area del grafico con livello di confidenza del 95%.

Anche per i terreni di tipo UWR3, lo scenario RCP2.6 non indica considerevoli cambiamenti della produzione rispetto agli standard attuali e le fluttuazioni interannuali sono ancor meno ampie rispetto a quelle dei terreni con maggior percolazione, fig. 3.5.4ap. Per tutto il secolo l'irrigazione rimane inferiore al valore di riferimento con delle variazioni che sono in alcuni casi sono positive, vedi fig. 3.5.4ai. Complessivamente, per i terreni con elevata capacità di trattenere l'acqua, l'ambiente per la coltivazione del mais rimarrà inalterato nell'ipotesi dello scenario RCP2.6.

Invece, per lo scenario RCP8.5, la richiesta idrica è prevista crescere in modo contenuto del corso dei decenni, fino a raggiungere un valore stabile alla fine del secolo con almeno un 10% in più di acqua richiesta rispetto all'attuale, vedi fig. 3.5.4bi. Inoltre la produzione ha un marcato trend negativo, dell'ordine di 10% di perdita ogni trent'anni, con oscillazioni interannuali molto contenute. Queste proiezioni suggeriscono che, nel caso lo scenario RCP8.5 fosse quello reale, l'ambiente di crescita del mais sarà sicuramente stressante per la pianta e conseguentemente sfavorevole a rese produttive confrontabili con le attuali.

fig. 3.5.4 – Impatti dei cambiamenti climatici sulla coltivazione del mais (Zea mays) su terreni di tipo UWR3, ovvero a bassa percolazione. Le serie temporali mostrano la media mobile, su 5 anni, delle variazioni percentuali, rispetto al periodo di riferimento 2006-2016, di produzione massa/ettaro per lo scenario RCP2.6 (ap) e per lo scenario RCP8.5 (bp), di irrigazione volume/ettaro per lo scenario RCP2.6 (ai) e per lo scenario RCP8.5 (bi). Le rette di regressione lineare sono riportate con la fascia scura indicante l'area del grafico con livello di confidenza del 95%.

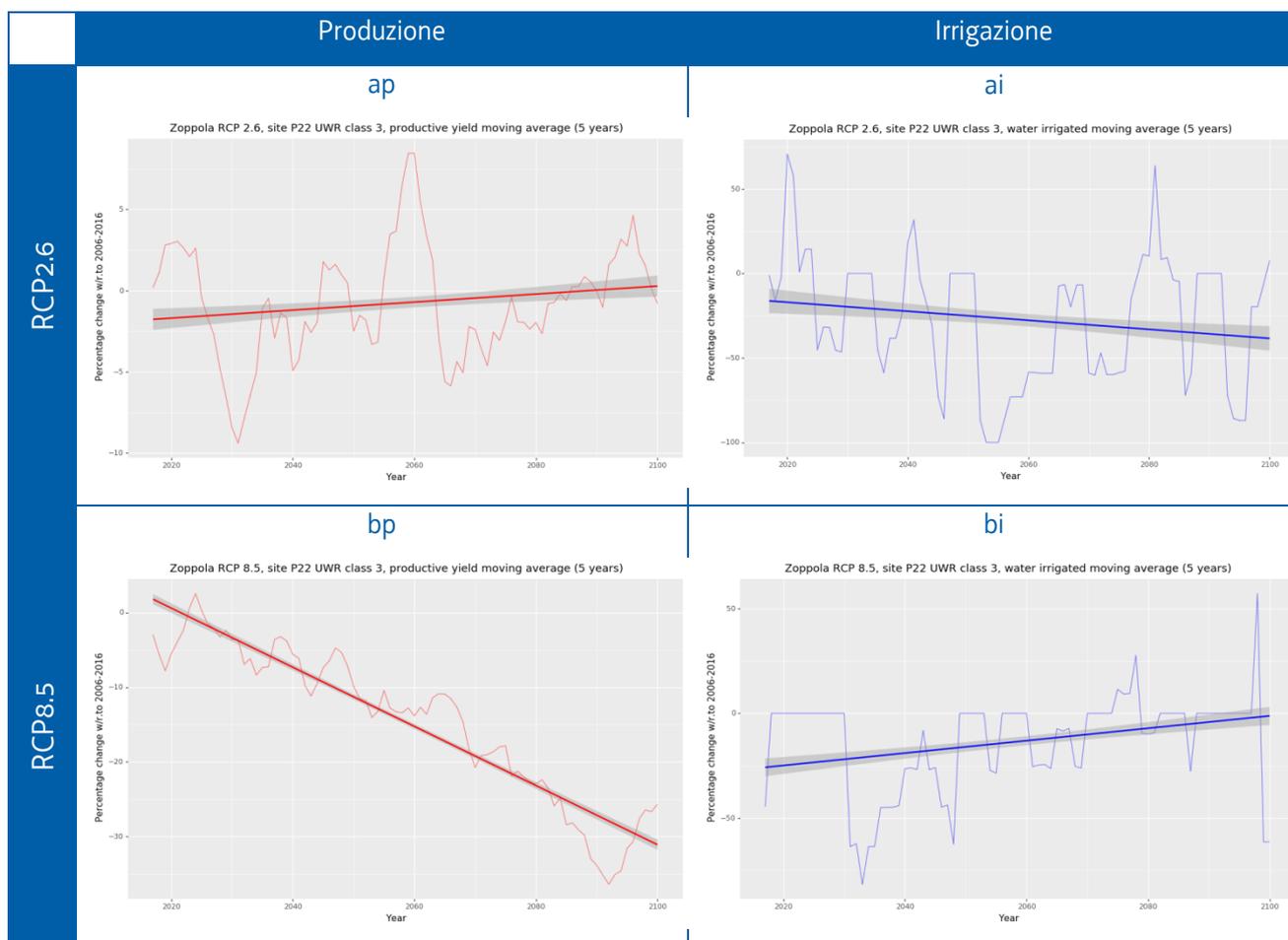



fig. 3.5.5 – Proiezioni delle variazioni delle temperature medie, espresse in gradi Celsius, e delle precipitazioni, espresse in percentuale, giornaliere sul Friuli Venezia Giulia per il secolo XXI, rispetto ai valori di riferimento del periodo 1976-2005. Sono tracciate le curve corrispondenti alle simulazioni dei cinque modelli scelti dalla base dati EURO-CORDEX e la media dell'intero ensemble. at) Temperature e ar) precipitazioni, riguardanti lo scenario RCP2.6; bt) temperature e br) precipitazioni riguardanti lo scenario RCP8.5.

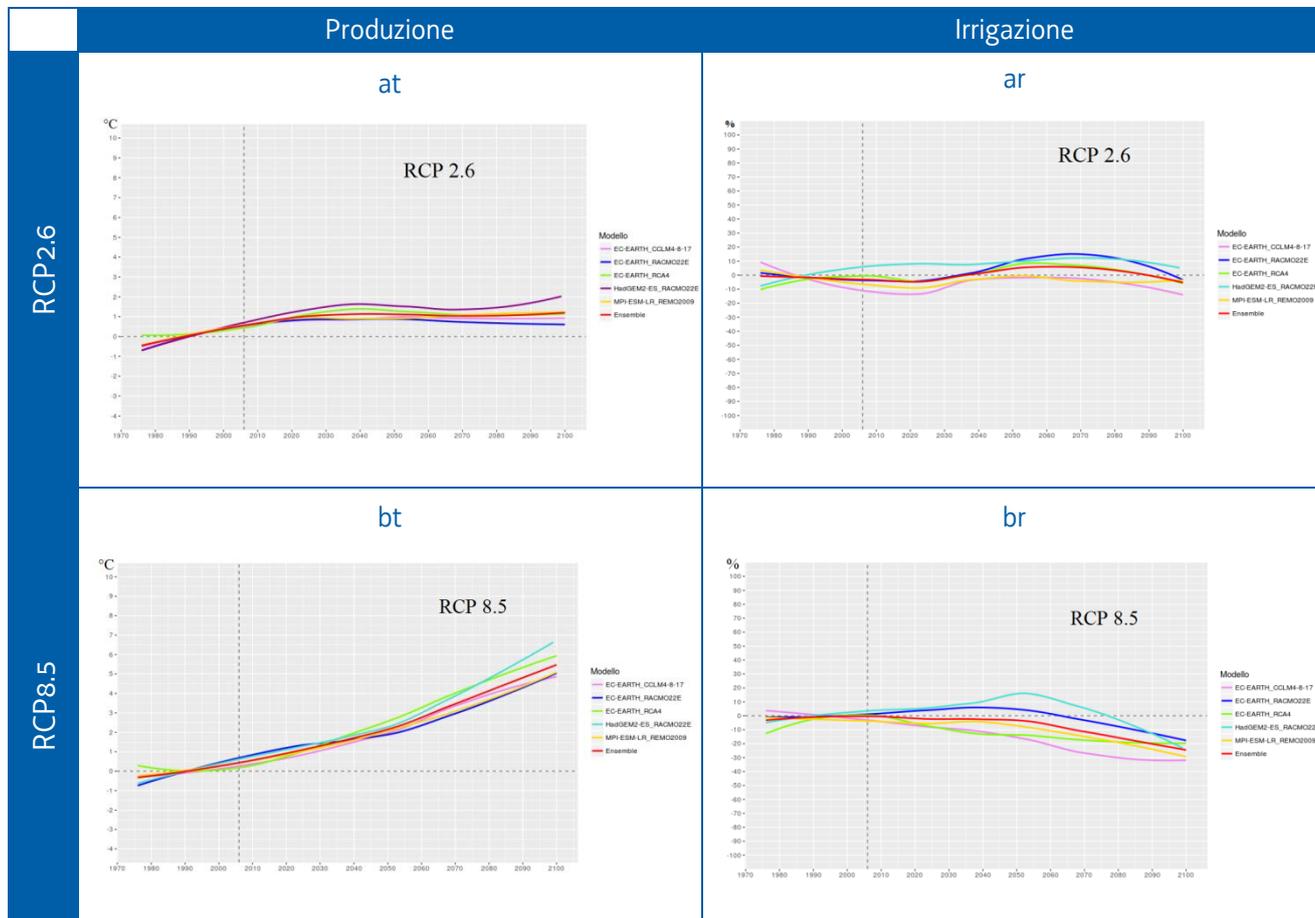
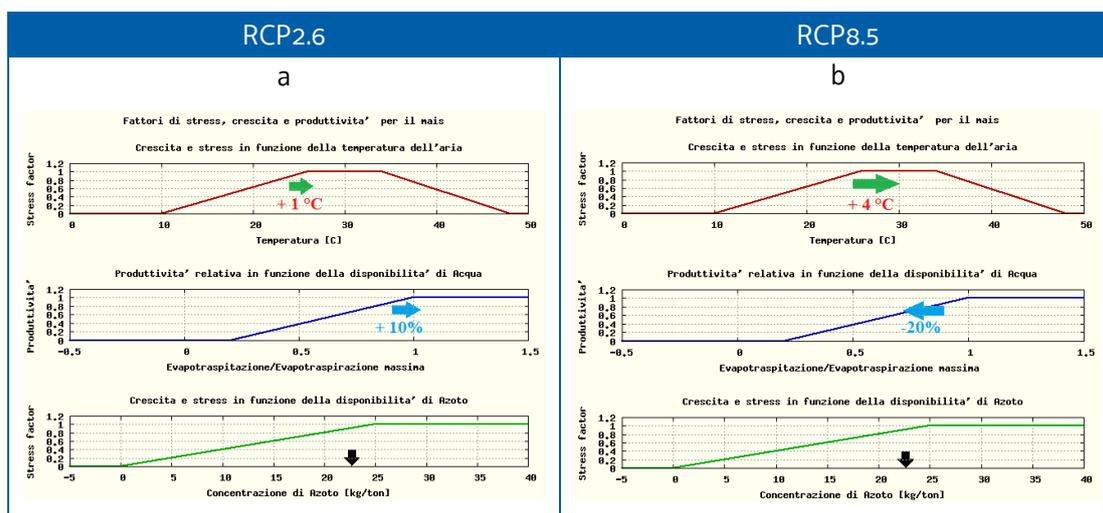



fig. 3.5.6 – Modifica dei fattori di stress, crescita e produttività del mais al variare delle condizioni ambientali descritte dello scenario RCP2.6 (a), e di quello RCP8.5 (b). I fattori di stress sono compresi tra 0 ed 1, dove lo stress massimo coincide con 0 e quello nullo con 1, mentre la produttività massima assume il valore 1 e quella nulla il valore 0 (Danuso et al. 1992), (Danuso et al. 1995) e (Doorenbos e Kassam, 1979). Si nota che, per lo scenario RCP2.6, il leggero aumento delle temperature medie e delle precipitazioni estive, a parità di fertilizzazione del terreno, diminuisce lo stress delle piante e ne aumenta la produttività. Nel caso dello scenario RCP8.5, invece, un eccessivo aumento delle temperature medie estive ed una concomitante riduzione delle precipitazioni, a parità di fertilizzazione del terreno, induce un ambiente stressante per le piante con conseguente riduzione della produttività.

Vitis vinifera

Gli impatti sulla vite (Vitis vinifera) sono stati affrontati considerando le fasi fenologiche della pianta. Nello specifico, utilizzando le caratteristiche del vitigno Tocai Friulano, sono stati calcolati i gradi giorno secondo la definizione classica, nella quale la temperatura soglia è fissata a 10 gradi centigradi.

Infatti, esiste una robusta correlazione tra la grandezza agrometeorologica gradi giorno, indicata anche con l'acronimo GDD (Growing Degree-Day), lo stato di avanzamento della crescita delle piante ed il raggiungimento delle fasi fenologiche che ne determinano le fasi della vita (ERSA-BBCH, 2017).

Pertanto, per ciascun anno del XXI secolo, sono state calcolate le giornate dell'anno nelle quali le principali fasi fenologiche del vitigno scelto vengono raggiunte. Il calcolo è stato eseguito sulla base delle serie temporali simulate dai cinque modelli EURO-CORDEX, selezionati in questo rapporto, per entrambe gli scenari RCP2.6 e RCP8.5. Allo scopo, sono state considerate serie di temperatura

rappresentative della pianura friulana, applicando la correzione per eventuali discostamenti sistematici delle simulazioni rispetto alle misure del periodo di riferimento, 1976-2005.

Nella sequenza delle figure numero 7 sono presentati i grafici che indicano il giorno dell'anno in cui viene raggiunta una determinata fase fenologica. Sono state scelte quattro fasi: germogliamento, indicata con budbreak e corrispondente all'indice BBCH 09; fioritura, indicata con flowering e corrispondente all'indice BBCH 65; invaiatura, indicata con veraison e corrispondente all'indice BBCH 81; ed infine maturazione, indicata con ripening e corrispondente all'indice BBCH 89. Per la definizione delle fasi fenologiche si veda (ERSA-BBCH, 2017).

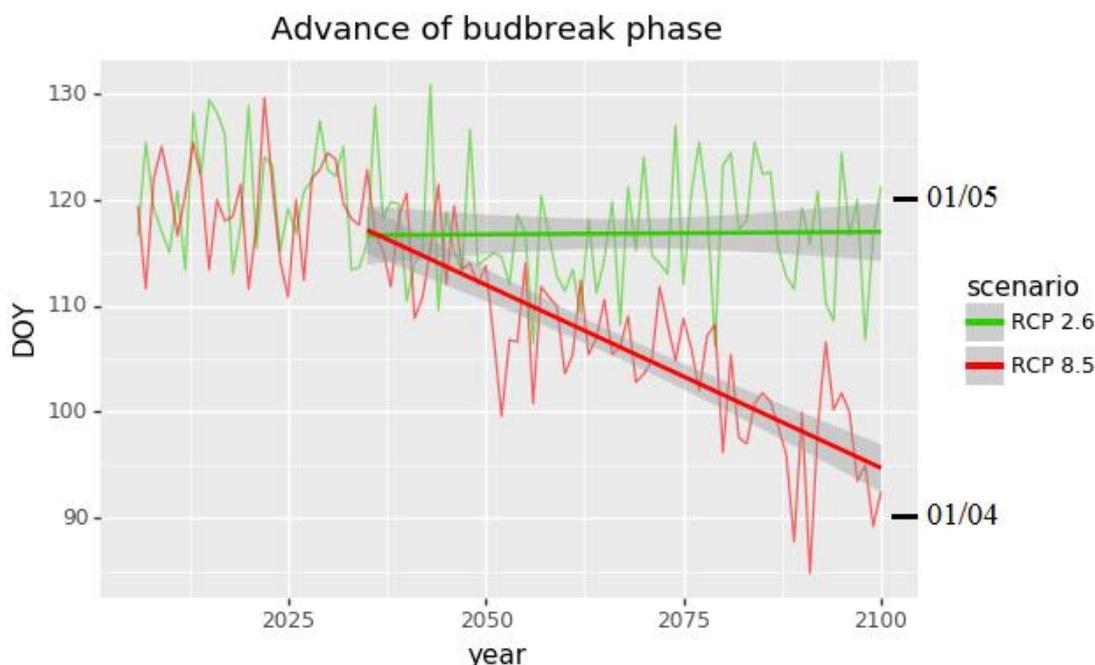
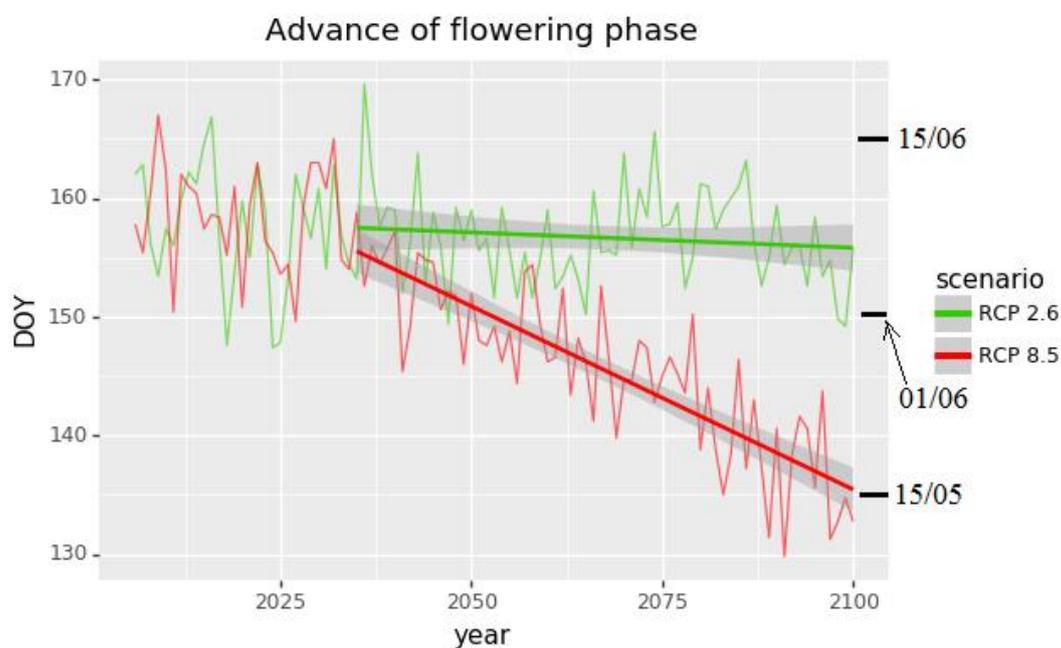
fig. 3.5.7 – serie temporale del giorno dell'anno (DOY) in cui viene raggiunta la fase di germogliamento, (budbreak), corrispondente all'indice fenologico BBCH 09, secondo i due scenari di cambiamento climatico, RCP2.6 in verde e RCP8.5 in rosso. Le curve sono la media mobile su 5 anni della media di ensemble delle proiezioni dei 5 modelli climatici selezionati in questo studio. Le rispettive rette di regressione sono tracciate a partire dal 2035.

Dalla fig. 3.5.7 si può constatare che, nel caso dello scenario RCP2.6, non sono evidenti variazioni sistematiche nella data di raggiungimento della fase fenologica del germogliamento, mentre è chiaro un progressivo anticipo nel caso dello scenario RCP8.5. Degno di nota anche il comportamento simile delle simulazioni fino al 2035, momento in cui le proiezioni dei due scenari iniziano a divergere. In particolare per lo scenario RCP8.5, alla fine del secolo le piante del vitigno Tocai Friulano germoglieranno agli inizi di aprile, anticipando di una ventina di giorni il periodo in cui attualmente viene raggiunto questo stadio vitale.

fig. 3.5.8 – serie temporale del giorno dell'anno (DOY) in cui viene raggiunta la fase di fioritura, (flowering), corrispondente all'indice fenologico BBCH 65, secondo i due scenari di cambiamento climatico, RCP2.6 in verde e RCP8.5 in rosso. Le curve sono la media mobile su 5 anni della media di ensemble delle proiezioni dei 5 modelli climatici selezionati in questo studio. Le rispettive rette di regressione sono tracciate a partire dal 2035.

Per quanto riguarda la fioritura, vedasi fig. 3.5.8, i due scenari portano a degli impatti analoghi a quelli del germogliamento. Infatti l'attuale periodo dell'anno in cui avviene la fioritura è mantenuto sostanzialmente invariato nello scenario RCP2.6, mentre con lo scenario RCP8.5 l'anticipo della fase fenologica è di circa venti giorni, spostandosi alla metà di maggio rispetto la prima decade di giugno, che è lo standard di questo inizio secolo. Per l'invaiatura e la maturazione completa dell'uva, gli impatti dei cambiamenti climatici secondo lo scenario RCP2.6 non indicano trend significativi nel periodo dell'anno in cui verrà raggiunta la fase fenologica. Anche l'ampiezza delle fluttuazioni interannuali viene preservata. Lo scenario RCP8.5, invece, indica un anticipo progressivo a partire dal 2030 circa, tanto che a fine secolo le fasi sono antipate di una ventina di giorni. Inoltre l'ampiezza delle fluttuazioni interannuali sono meno ampie per lo scenario RCP8.5 rispetto a quelle dello scenario RCP2.6 e a quelle osservate negli ultimi decenni.

In estrema sintesi gli effetti della sostanziale differenza nei trend delle temperature medie giornaliere, che i due scenari, RCP2.6 e RCP8.5, prospettano a partire dal 2030 circa, si concretizzano nel progressivo anticipo di tutte delle fasi fenologiche, nel caso venga considerato lo scenario a maggior riscaldamento globale (RCP8.5).

fig. 3.5.9 – serie temporale del giorno dell'anno (DOY) in cui viene raggiunta la fase di invaiatura, (veraison), corrispondente all'indice fenologico BBCH 81, secondo i due scenari di cambiamento climatico, RCP2.6 in verde e RCP8.5 in rosso. Le curve sono la media mobile su 5 anni della media di ensemble delle proiezioni dei 5 modelli climatici selezionati in questo studio. Le rispettive rette di regressione sono tracciate a partire dal 2035.

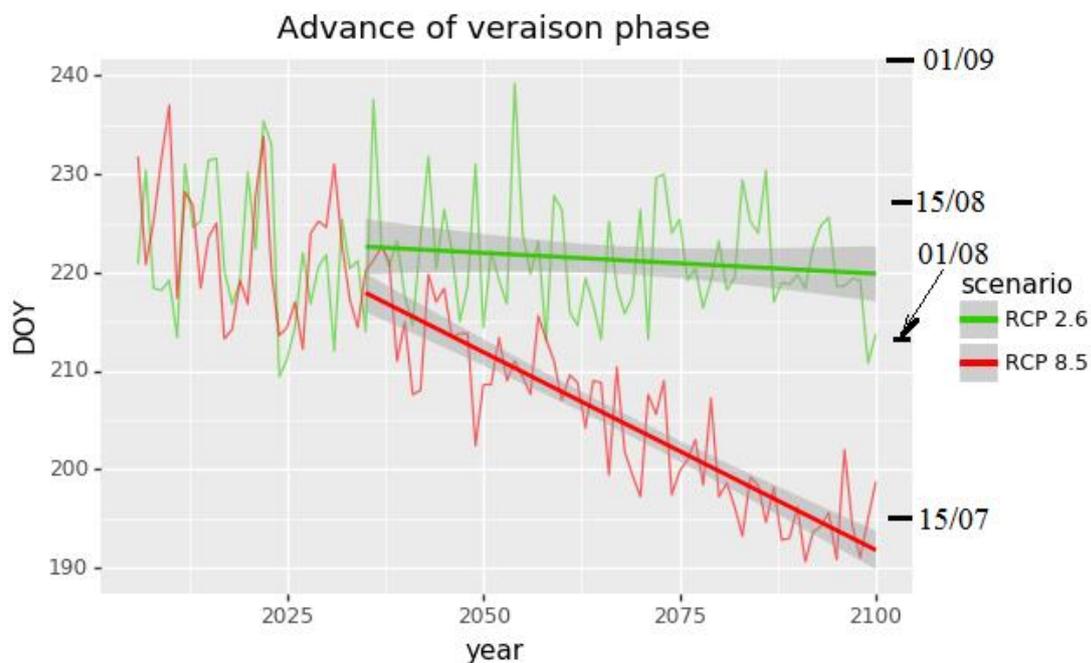



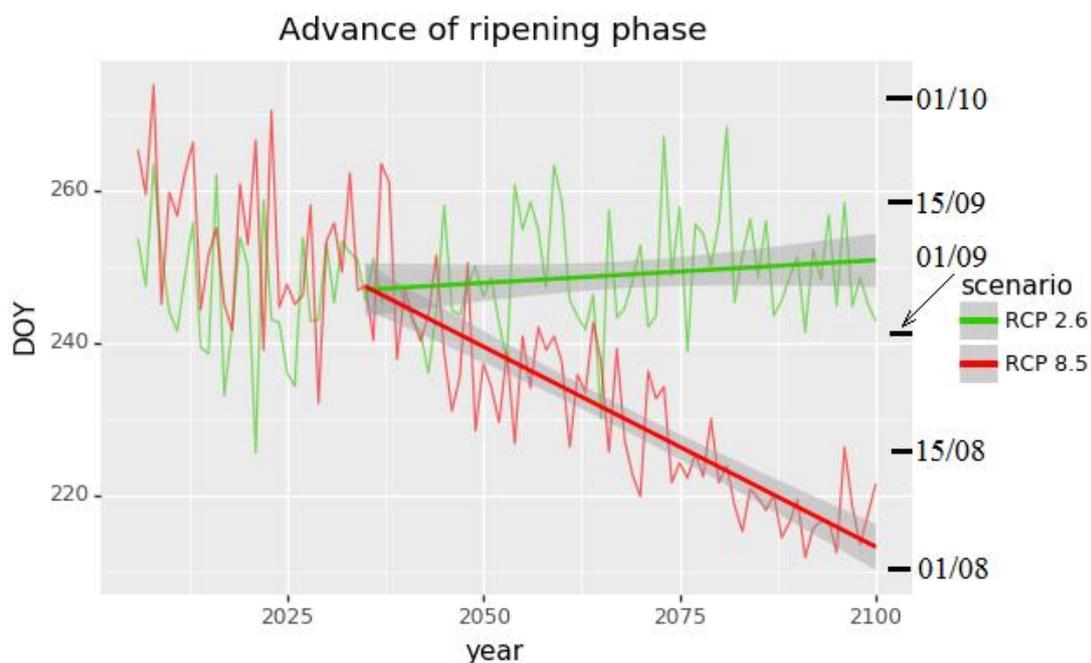
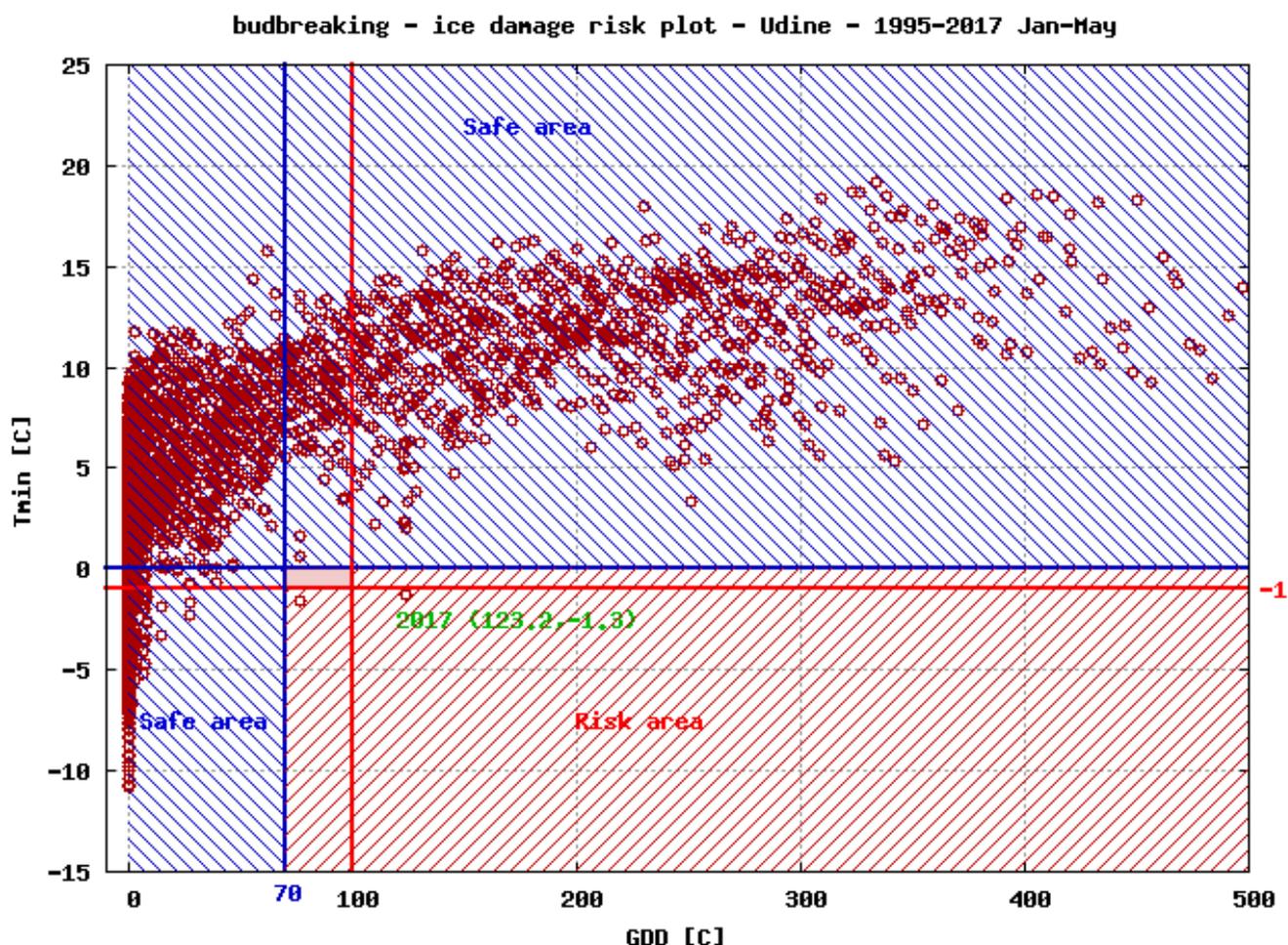
fig. 3.5.10 – serie temporale del giorno dell'anno (DOY) in cui viene raggiunta la fase di maturazione, (ripening), corrispondente all'indice fenologico BBCH 89, secondo i due scenari di cambiamento climatico, RCP2.6 in verde e RCP8.5 in rosso. Le curve sono la media mobile su 5 anni della media di ensemble delle proiezioni dei 5 modelli climatici selezionati in questo studio. Le rispettive rette di regressione sono tracciate a partire dal 2035.

Tra i rischi in cui possono incorrere le colture a ciclo produttivo annuale, nella nostra regione, vi sono gli estremi di temperatura dell'aria che, se mantenuti anche solo per poche ore, riescono a causare danni alla pianta. Si tratta di danni che risultano irreversibili durante il ciclo annuale e pregiudicano la produzione. Un esempio per la vite sono le gelate tardive, ovvero situazioni meteorologiche della durata di una notte in cui la temperatura minima scende al di sotto dello zero Celsius, causando il congelamento dell'acqua presente nei tessuti vegetali.

fig.3.5.11 – Situazioni di rischio gelate tardive dannose per la vite. Il grafico riporta in ascisse i gradi giorno (GDD), che sono correlati con la fase fenologica della vite (soglia 10 °C). Le ordinate indicano la temperatura minima (°C) misurata nella giornata corrispondente al valore di gradi giorno riportato in ascisse. Sono evidenziate in rosso le aree in cui valori di temperatura minima inferiori allo zero Celsius possono essere indicativi di gelate dannose per la pianta, nella fase fenologica in cui si trova. Le aree a sfondo blu indicano situazioni in cui eventuali gelate non danneggiano la pianta oppure non vi sono le condizioni per una gelata. Ciascun punto è stato ottenuto utilizzando le misure della stazione meteorologica di Udine S. Osvaldo, del periodo che va da inizio gennaio alla fine di maggio di tutti gli anni compresi tra il 1995 ed il 2017, estremi inclusi. L'evento particolarmente grave che ha interessato i vigneti regionali nel 2017 è evidenziato con l'etichetta verde, in cui sono riportati i valori dell'ascissa e dell'ordinata.

Tali situazioni sono rilevanti quando avvengono in periodi dell'anno in cui sono state raggiunte delle fasi fenologiche avanzate nel ciclo annuale. Per la vite non sono particolarmente frequenti, si veda fig. 3.5.8; solo due eventi sono da considerare rilevanti negli ultimi 23 anni e il più importante riguarda all'anno 2017. L'approccio qui presentato viene portato come esempio di possibili impatti dei cambiamenti climatici anche su altre colture.

Data per assodata la tendenza al riscaldamento globale del pianeta, spesso si trascurano i casi in cui il congelamento è la fonte del rischio, ma esistono motivazioni fondate sulla circolazione atmosferica a scala continentale, detta sinottica, che ne suggeriscono lo studio approfondito. Infatti, la situazione meteorologica, che causa eventi di gelata tardiva nella pianura della regione Friuli Venezia Giulia, è caratterizzata dalla discesa di aria fredda e secca dal nord Europa nell'ambito di perturbazioni che si sviluppano nel fronte polare. Il fronte polare, che è una caratteristica globale dell'atmosfera alle medie latitudini, si approssima all'arco alpino nei mesi invernali, mentre si sposta verso nord nei mesi caldi. In primavera, che è una stagione di transizione, le irruzioni di aria fredda verso sud possono ancora interessare la pianura friulana, determinando un generale abbassamento delle temperature medie giornaliere. Vengono così a formarsi le condizioni di forte perdita di energia da parte della superficie terrestre, come conseguenza dell'irraggiamento nelle notti calme e secche, le quali solitamente seguono la perturbazione che ha convogliato aria polare verso le medie latitudini. In questa situazione le temperature minime posso scendere sotto lo zero Celsius, anche di alcuni gradi, nei primi metri d'aria al di sopra del terreno, ghiacciando l'acqua. Tenuto conto che l'aumento delle temperature medie giornaliere induce una precessione nel raggiungimento delle fasi fenologiche di piante come la vite, vedi sequenza di figure dalla 3.5.7 alla 3.5.10, viene spontaneo chiedersi se anticiperà, alla stessa velocità, anche il periodo dell'anno in cui le condizioni per il verificarsi di congelamenti tardivi diventano impossibili. Se così non fosse, e nell'ambito dei cambiamenti climatici in atto fosse plausibile una sfasatura tra i due, la probabilità di gelate tardive varierebbe nel corso degli anni. Infatti se la migrazione verso nord della posizione primaverile del fronte polare avverrà con tempi scala maggiori rispetto a quelli dell'aumento delle temperature medie regionali, è possibile che ci vi siano periodi del XXI secolo in cui irruzioni di aria fredda abbiano probabilità non trascurabile, o perfino maggiore dell'attuale, di accadere quanto le piante hanno già raggiunto una fase fenologica vulnerabile al congelamento. Nella fig. 3.5.11, questo fatto apparirebbe come il popolamento di quella zona di grafico evidenziata con sfondo colorato di rosso, delimitata dalle rette rossa e blu.

Sono stati eseguite delle simulazioni sulla probabilità del manifestarsi di situazioni dannose dovute a gelate tardive, per la vite. I risultati, per ciascun dei due scenari RCP2.6 e RCP8.5, indicano che in futuro la probabilità sarà nulla.

Questa tecnica di valutazione degli impatti dovuti a gelate tardive è applicabile anche ad alberi da frutto e altre piante potenzialmente esposte a tale rischio.

Considerazioni conclusive

L'applicazione integrata della modellistica numerica sull'evoluzione climatica a scala regionale, con quella della crescita colturale di piante di interesse economico, è applicabile con profitto allo studio degli impatti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura regionale. Gli esperimenti eseguiti sul mais (Zea mays) suggeriscono che, nel caso lo scenario evolutivo climatico sia quello definito come RCP2.6 (van Vuuren et al, 2011), ovvero quello in cui il forzante antropico è contenuto e gestito al fine di minimizzare gli effetti sul clima futuro, le condizioni ambientali saranno favorevoli alla produzione di questo cereale con la stessa resa attuale e probabilmente con risparmio di risorse idriche. Anche per le fasi fenologiche della vite, in particolare del vitigno Tocai Friulano, questo scenario non implica impatti evidenti.

Completamente diversi sono i risultati ottenuti simulando gli impatti con lo scenario RCP8.5, il peggiore tra quelli considerati nei cambiamenti climatici globali. In quella situazione, la pianura della regione Friuli Venezia Giulia, indipendentemente dal tipo di terreno considerato, presenterebbe condizioni ambientali meno favorevoli delle attuali per la crescita e lo sviluppo del mais, il quale per essere messo in condizioni di sopravvivere richiederebbe un maggior volume di acqua. Anche le fasi fenologiche della vite subirebbero un progressivo anticipo, a partire dal 2030 circa, giungendo a tutte le fasi di vita con una ventina di giorni in anticipo rispetto agli attuali standard.

Lo studio evidenzia la necessità di considerare, tra gli impatti dei cambiamenti climatici, anche eventi meteorologicamente peculiari, che potrebbero aumentare il rischio di causare situazioni di stress di breve durata, ma con conseguenze permanenti sulle piante, durante tutto il corso del loro ciclo vitale annuale.

Certamente questo studio esplorativo tramite modellistica integrata non è esaustivo delle problematiche connesse agli impatti dei cambiamenti climatici sull'agricoltura, ma dimostra che è possibile affrontare il problema con strumenti che danno risposte quantitative e le cui incertezze possono essere valutate. Molti possono essere gli sviluppi futuri, semplicemente estendendo lo studio degli impatti ad altri tipi di colture. Nel caso della vite, oltre all'applicazione ad altri vitigni, si potranno applicare i metodi della lotta guidata ai parassiti per evidenziare eventuali evoluzioni delle condizioni ambientali favorevoli all'insorgenza di malattie.

E' possibile un ulteriore affinamento del presente approccio modellistico integrato, inserendo nella tecnica anche le informazioni sulle specificità meteorologiche sito-dipendenti. Infatti si possono costruire delle serie temporali di grandezze meteorologiche future utilizzando sia le misure rilevate in passato e rappresentative della zona considerata, sia quelle generate tramite modelli numerici climatici regionali. Va ricordato che tali informazioni meteorologiche sarebbero rappresentative di un'area al più confrontabile con quella di cui le misure lo sono, inoltre avrebbero il vantaggio di essere sito specifiche e correlate spazialmente con quelle dei siti circostanti, anche nelle fluttuazioni iterannuali. In questo modo l'approccio modellistico colturale potrebbe essere applicato a specie vegetali, che vivono in aree del territorio regionale aventi peculiarità microclimatiche.

3.6 Acquacoltura (mare, acque interne e di transizione)

Francesca Tulli, Emilio Tibaldi - Università degli Studi di Udine

Si osserva che la molluschicoltura e la vallicoltura saranno i settori nell'ambito dell'acquacoltura regionale più vulnerabili ai cambiamenti climatici attesi e saranno quelli sottoposti al maggior numero di pressioni con impatti rilevanti sulle attività produttive. La molluschicoltura sta registrando già negli ultimi anni un aumento dell'incidenza della presenza di biotossine algali che limitano la commercializzazione del prodotto.

Sintesi

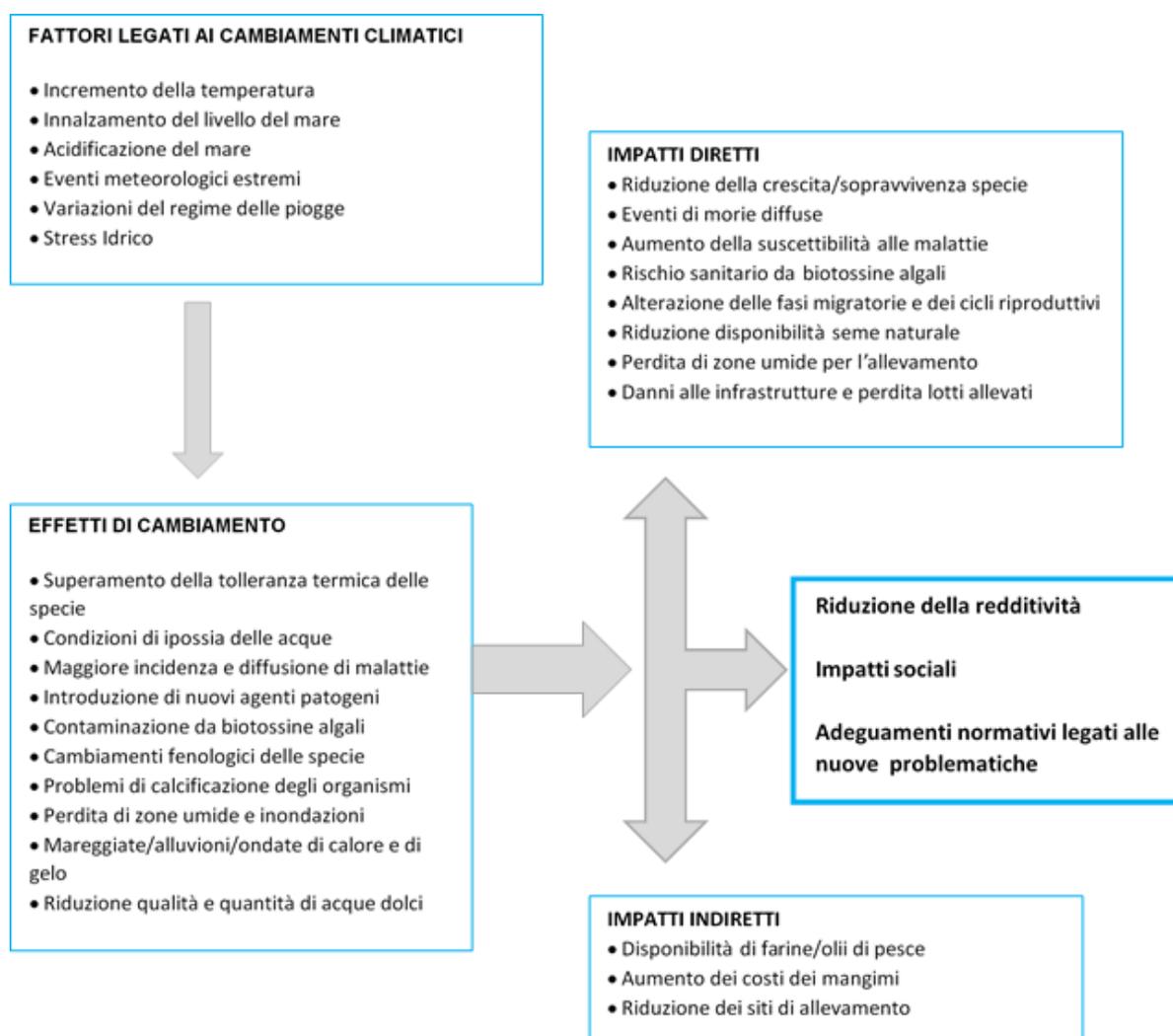
L'acquacoltura del Friuli-Venezia Giulia è leader nazionale nella troticoltura e riveste importanza lungo la fascia costiera con la molluschicoltura (mitili e vongole). Si caratterizza per l'utilizzo di tutte le tipologie di acque disponibili (dolci, salmastre, marine costiere) e sistemi produttivi in funzione della localizzazione geografica, condizioni ambientali ed input tecnologico (allevamenti estensivi nelle valli da pesca e lagune, long-line lungo la costa e sistemi intensivi a terra). Marginale è l'allevamento in gabbie a mare. Partendo dalle analisi dell'IPCC, dalle conoscenze disponibili e dal giudizio esperto frutto di interviste ad operatori rappresentativi delle diverse tipologie produttive, si ritiene che la molluschicoltura e la vallicoltura siano più vulnerabili ai cambiamenti climatici attesi e saranno sottoposte al maggior numero di pressioni con impatti rilevanti sulle attività produttive. Mentre la tecnologia long-line può rappresentare un'alternativa "meno vulnerabile" per la mitilicoltura, la venericoltura ha minori possibilità di adattamento. L'innalzamento del livello del mare e le inondazioni, minacciano l'esistenza stessa delle aree lagunari dove viene praticata la venericoltura e la vallicoltura con conseguenze anche sulla produttività di questi ambienti. La disponibilità di risorse idriche e gli eventi meteoclimatici estremi rappresentano invece i rischi maggiori rispettivamente per la troticoltura e l'ittiocoltura marina.

Evidenze attuali

L'acquacoltura è il settore a più rapida crescita nell'ambito delle produzioni agroalimentari ed è il sistema di produzione animale con la più bassa incidenza sulle emissioni di gas serra (FAO, 2010; Meyhoff Fry, 2012). La regione Friuli Venezia Giulia, per vocazione territoriale detiene storicamente il ruolo di leader in Italia nell'allevamento della trota con 70 siti produttivi e circa il 35 % della produzione nazionale realizzata entro i suoi confini amministrativi (API, 2015 comm. pers.). Anche la molluschicoltura rappresenta una importante realtà economica ed occupazionale che conta in Regione 20 imprese e 145 addetti (Zentilin, 2017), dediti all'allevamento dei mitili lungo la costiera triestina ed alla venericoltura più recentemente insediatasi nelle Lagune di Grado e Marano dove viene storicamente praticata anche la vallicoltura cioè l'allevamento estensivo di cefali, anguilla, branzino ed orata. Del tutto marginali sono le produzioni di altre specie ittiche dulciacquicole e di quelle marine in gabbia.

L'acquacoltura regionale sfrutta tutte le tipologie di acque disponibili: le acque dolci superficiali e profonde, sia fredde che calde, le acque salmastre degli ambienti lagunari e le acque salate delle zone costiere. I sistemi di produzione sono altrettanto diversificati in ragione delle specie allevate e del contesto ecologico e geoclimatico dei siti di allevamento e variano dal modello estensivo praticato nelle valli da pesca lagunari, ai sistemi altamente intensivi che utilizzano vasche a terra e gabbie in mare sia di superficie che sommerse.

Attualmente vi sono in assoluto poche evidenze di impatto sulle attività acquacolturali certamente e direttamente attribuibili ai cambiamenti climatici. Vi sono al contrario alcune analisi che a partire dalle ricadute dirette ed indirette dei cambiamenti climatici attesi sulle variabili ecologiche che controllano e regolano la biologia e degli organismi acquatici allevati, ne prevedono effetti ed impatti (Rosa et al., 2012; Castellari et al., 2014) (fig. 3.6.1).

fig. 3.6.1 Fattori ed effetti del cambiamento climatico sull'acquacoltura

Le conoscenze disponibili sono tuttavia ancora molto scarse e le incertezze che permangono richiedono studi e ricerche per valutare le strategie di adattamento più adeguate, le opportunità che possono emergere e minimizzare gli effetti avversi che i cambiamenti climatici potranno avere sull'acquacoltura regionale che localizzata nell'area del Mediterraneo ritenuta più sensibile ai cambiamenti climatici quale l'Alto Adriatico, (Philippart et al., 2011; Torresan et al., 2012).

Metodologia

Partendo dalle evidenze dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dalle conoscenze disponibili e dal giudizio esperto frutto di interviste dirette ad operatori rappresentativi delle diverse tipologie produttive per valutare la percezione delle implicazioni sulla rispettiva attività produttiva presenti sul territorio regionale, viene fornita una previsione del grado di vulnerabilità dei diversi sistemi di produzione acquacolturale presenti in Friuli Venezia Giulia e proposte alcune misure di adattamento.

Impatti futuri

Come riassunto nella fig. 3.6.1 è riconosciuto ed ampiamente atteso che gli effetti dell'innalzamento delle temperature e del livello del mare, dell'acidificazione delle acque, delle variazioni nei regimi delle precipitazioni e gli eventi meteorici estremi eserciteranno impatti diretti ed indiretti sulle attività acquacolturali e interesseranno congiuntamente tanto gli aspetti infrastrutturali che quelli biologici legati alla resilienza ecofisiologica delle specie allevate. Si ritiene tuttavia che non sarà agevole discernere gli effetti causativi dei vari elementi di impatto dovuti ai cambiamenti climatici, non potendo sempre attribuirli a singoli fattori di cambiamento. In molti casi si prevede che gli impatti sull'acquacoltura deriveranno da una concatenazione di effetti causativi e non da singoli fattori (De Silva e Soto, 2009). Sul lato biologico si potranno avere ripercussioni sulla crescita e sulla sopravvivenza delle specie allevate e, per quelle il cui allevamento dipende dalla disponibilità di seme selvatico, i cambiamenti negli habitat dai quali gli adulti dipendono può ridurre la disponibilità di materiale da semina, con effetti indiretti sui cicli di produzione.

Lo scenario A1B prospettato dal IPCC indica per la fine del 21 secolo un **incremento della temperatura** dell'aria nella regione Mediterranea compreso tra 2,2 °C e 5,5 °C (IPCC, 2007). Questo incremento termico avrà impatto ovviamente diverso sull'acquacoltura in funzione del sistema produttivo, della specie oggetto di allevamento e della localizzazione geografica. Nella regione Friuli Venezia Giulia l'attività produttiva attualmente prevalente è rappresentata dall'allevamento della trota iridea. Questa specie, per sua natura esigente dal punto di vista termico perché ha un intervallo di temperatura ottimale molto ridotto (14 -18°C) e un limite termico superiore relativamente basso (20°C), potrà in alcune situazioni parzialmente beneficiare dell'incremento di temperatura che si tradurrà in un incremento del tasso di metabolismo e quindi della velocità di crescita, ma in generale lo scenario prospettato è sfavorevole per gli effetti sulla resistenza degli animali e la diffusione di patologie (Ficke et al., 2007).

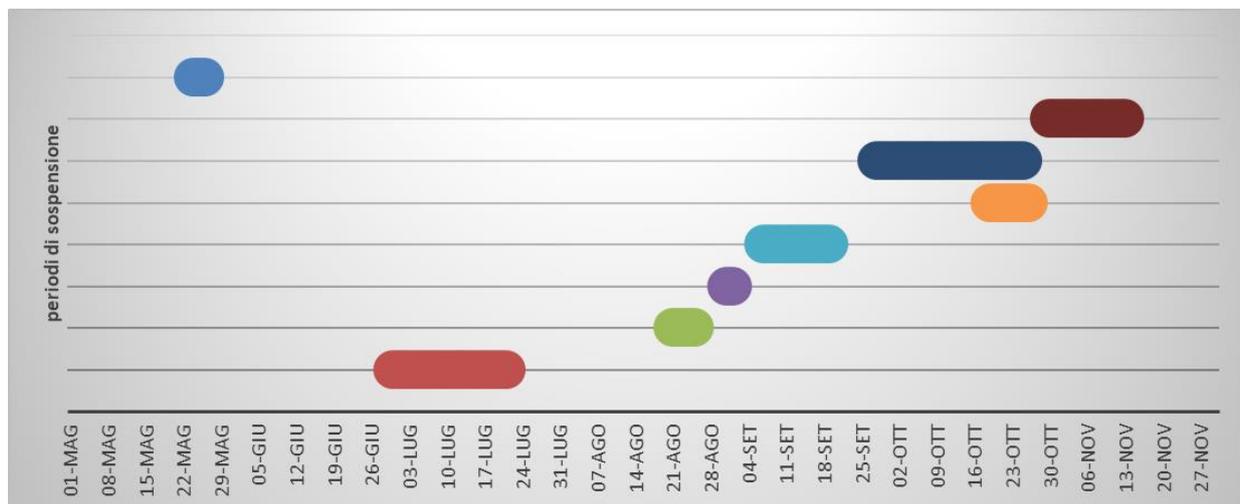
I cambiamenti di temperatura potrebbero inoltre avere importanti effetti biologici e causare uno sfasamento tra gli eventi riproduttivi e la disponibilità trofica per l'accrescimento delle larve e dei giovanili, con effetti sul reclutamento e lo stato delle popolazioni. La piscicoltura estensiva che si esercita tipicamente nelle valli e nelle lagune, potrebbe essere influenzata profondamente dai cambiamenti fenologici delle specie ittiche che vivono in questi ambienti, come ad esempio spigola, orata, cefali così come indurre alterazioni fisiologiche nei molluschi bivalvi quali differenze nella formazione della conchiglia e /o formazione del bisso nel caso dei mitili come già segnalato dagli operatori del settore.

L'attenzione verso la diversificazione delle specie di allevamento con la preferenza verso quelle euriterme rappresenta una delle misure di adattamento a questo problema.

Anche l'accrescimento dei molluschi può essere influenzato negativamente dal riscaldamento delle acque superficiali come evidenziato da uno studio recente che simula l'impatto dell'aumento della temperatura e di altre

variabili sull'allevamento della vongola filippina nella Laguna di Venezia. Lo studio rivela anche una riduzione della finestra temporale ottimale per la semina e suggerisce misure gestionali adattative (Chinellato et al., 2012).

La **riduzione della concentrazione di ossigeno** in acqua è un altro problema derivante dall'innalzamento della temperatura. Temperature medie troppo elevate o ondate di calore estivo possono determinare zone di anossia, definite dead-zone per le specie come la vongola verace allevata su aree di basso fondale. L'aumento della temperatura associato all'eutrofizzazione delle acque può determinare l'insorgenza di fioriture algali che producono **biotossine**, pericolose per le specie acquatiche e per l'uomo (Hinder et al., 2012; Marques et al., 2010). Alcune specie si sviluppano a concentrazioni tali da ridurre la concentrazione di ossigeno e creare condizioni di ipossia. Il Laboratorio Nazionale di Riferimento per le Biotossine Marine segnala casi di intossicazione in Friuli e Emilia-Romagna causati da Dinoficee già crescenti nel tempo (fig 3.6.2).

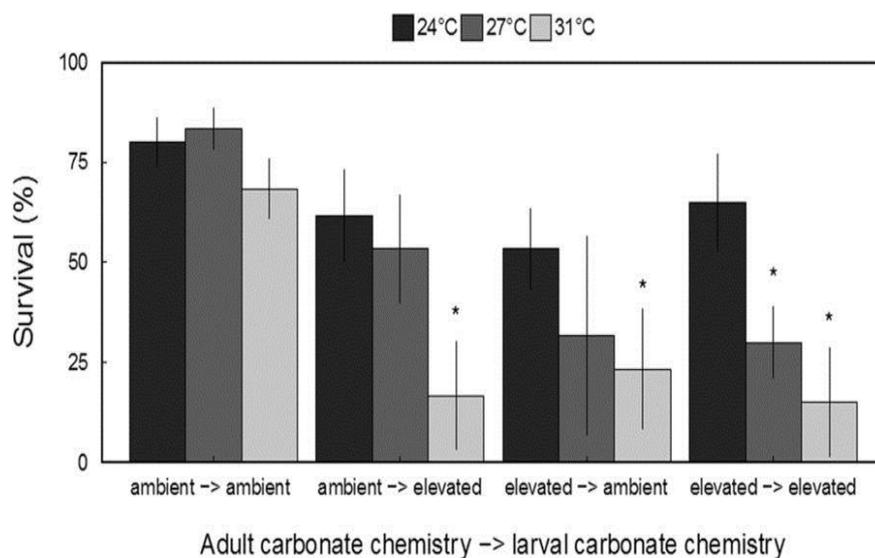
fig. 3.6.2 – Periodi di divieto di immissione al consumo umano diretto dei molluschi bivalvi vivi estratti dalle acque del FVG per il periodo maggio-novembre 2017 (Zentilin, comm. pers.)

I cambiamenti climatici responsabili dell'innalzamento termico delle acque potranno avere un impatto rilevante sulla diffusione e severità di **malattie infettive ed infestive** negli animali acquatici allevati. Per quanto concerne i parassiti, si ritiene che i cambiamenti climatici, alterandone le dinamiche di trasmissione, ne incrementeranno la patogenicità senza necessità di variazioni evolutive nel rapporto parassita-ospite (Hatcher e Dunn, 2011). Agenti patogeni, quali Virus e Batteri sono ubiquitari nelle acque e la loro crescita è dipendente dalla temperatura delle acque. Lo stress termico di per sé agisce come fattore immunodepressivo e può contribuire ad una maggior suscettibilità a patogeni comuni o di nuove comparsa. Ci si attende quindi che le variazioni del clima possano determinare un maggiore rischio epidemiologico. Si tratta di un aspetto fortemente percepito da tutti gli stakeholders intervistati. Un esempio è dato dalle infezioni da cocchi Gram positivi come le Streptococcosi sostenute da germi patogeni con temperatura superiore a 15°C, che colpiscono sia Salmonidi che pesci marini e che da oltre un decennio affliggono con crescente gravità la troticoltura friulana. Gli intervistati sottolineano il preoccupante parallelismo tra frequenza-severità di queste batteriosi e innalzamento termico stagionale delle acque delle troticolture. Anche i molluschi, sensibili alle malattie batteriche come ad esempio le vibriosi nelle prime fasi di sviluppo, potrebbero risultare più vulnerabili.

L'**aumento del livello del mare** comporterà il rischio di inondazioni lungo la costa con riduzione e perdita di zone umide, in corrispondenza delle foci dei fiumi e delle pianure depresse presenti principalmente nell'Alto Adriatico (25,4%) con conseguente forte rischio per le zone umide e per le arginature delle valli da pesca e lagune dove insistono le attività di piscicoltura estensiva e la venericoltura. Azioni mirate alla gestione conservativa della fascia costiera e delle zone umide hanno un'importanza strategica per l'adattamento ai cambiamenti climatici (Ghezzo et al., 2011).

Un altro aspetto è rappresentato dall'**infiltrazione di acqua salata** nelle falde costiere di acqua dolce con impatto sulla disponibilità e la qualità di acqua dolce, e la trasformazione di acque salmastre in acque ipersaline con effetti negativi sull'allevamento di specie d'acqua dolce e salmastra. Il problema dell'infiltrazione salina potrà essere ulteriormente aggravato dalla riduzione del deflusso e dall'aumento del prelievo di acqua dolce a seguito del maggiore consumo in molte zone costiere. Il cambiamento delle specie allevate, con la preferenza di quelle eurialine e, dove possibile, l'allontanamento degli impianti produttivi dalla costa in siti più idonei, rappresentano alcune misure di adattamento a questo problema.

La **riduzione del pH** e della disponibilità dei carbonati in acqua influenzerà i processi di formazione e dissoluzione delle parti scheletriche e della conchiglia di molti organismi marini, con possibili impatti sulla loro sopravvivenza e sulla fitness (Orr et al., 2005; CIESM, 2008). Tra le specie d'acquacoltura, i molluschi bivalvi, tra cui vongole e mitili, sono tra i più vulnerabili all'acidificazione. Il valore del pH delle acque marine si attesta attualmente tra 7.9-8, ma nel prossimo secolo, potrebbe calare di 0.1-0.3 unità (Birchenough, 2015). Diversi recenti studi hanno evidenziato problemi nella calcificazione della conchiglia già negli stadi iniziali di sviluppo di questi organismi con conseguenti anomalie nello sviluppo, riduzione della crescita e della sopravvivenza (Gazeau et al., 2010; Range et al., 2011; Griffith e Gobler, 2017) (fig. 3.6.3).

Nel caso di un possibile scenario in cui si assiste ad una riduzione dei valori di pH da 8,1 a 7,4, la vongola risulta meno tollerante rispetto al mitilo e ha mostrato inoltre una dissoluzione della conchiglia più marcata in tempi più brevi. Per entrambe le specie, a confermare le indicazioni tratte dai dati morfologici, anche i parametri fisiologici hanno mostrato condizioni di stress negli animali trattati a pH ridotto, seppure con effetti più marcati nelle vongole (Chinellato, 2010). Durante il ciclo di sviluppo dei molluschi bivalvi, la fase di transizione dalla forma larvale pelagica a quella giovanile bentonica, è molto critica e caratterizzata da un'elevata mortalità naturale, pertanto ulteriori stress ambientali potrebbero ridurre significativamente il reclutamento del seme in natura, come è già stato dimostrato sperimentalmente in esperimenti condotti nel Tirreno centrale posizionando dei collettori artificiali lungo un gradiente di CO_2 e pH (Matozzo et al., 2012). Per la molluschicoltura, questo problema in futuro potrà comportare la riduzione della disponibilità di seme naturale per l'avvio delle attività di allevamento e la necessità di approvvigionamento di seme artificiale prodotto negli schiuditoi. La ricerca genetica potrebbe contribuire alla selezione di specie/ceppi di molluschi bivalvi più tolleranti ad acque più acide e con minore durezza.

fig. 3.6.3 – Sopravvivenza di stadi larvali di pectinidi esposti a temperature crescenti (n = 6 media ± deviazione standard; * denota differenze significative rispetto al controllo (e.g. 24 °C) per ciascuna tesi sperimentale (da Griffith e Gobler, 2017)

Anche nei Pesci l'acidificazione potrebbe influenzare la formazione delle parti calcificate del corpo, come otoliti, colonna vertebrale e raggi delle pinne con problemi potenziali sullo sviluppo, sulla capacità di nuoto, di alimentazione e di comportamento con effetti a lungo termine sulla sopravvivenza e sulla crescita. Analogamente ai molluschi bivalvi, l'acidificazione del mare in futuro potrebbe quindi ridurre il reclutamento dei giovanili in natura e influenzare lo stato delle popolazioni di molte specie ittiche. Questo problema potrebbe avere un impatto sulla piscicoltura estensiva basata sia sulla rimonta naturale del novellame sia sulla loro cattura in natura e successiva semina nelle valli e nelle lagune costiere. Il ricorso alla semina con giovanili artificiali prodotti in avannotteria può ovviare a questo problema, ma comporterebbe, tra l'altro, un aggravio dei costi di produzione.

Alterazione del regime delle precipitazioni e le inondazioni comportano un peggioramento della qualità delle acque, con aumento della torbidità, del carico di nutrienti e di contaminanti in prossimità delle foci dei fiumi e lungo le coste adiacenti con impatti prevedibili sugli impianti di molluschicoltura e di piscicoltura estensiva. Elevate concentrazioni di solidi sospesi potrebbero ridurre i tassi di filtrazione dei molluschi bivalvi, mentre un eccessivo carico di nutrienti potrebbe causare fenomeni di eutrofizzazione, di ipossia/anossia delle acque e fioriture di alghe tossiche. Gli allagamenti degli impianti potrebbero inoltre determinare mortalità massive dei pesci allevati, danni strutturali, con conseguente perdite economiche, rischio di fughe degli animali allevati nell'ambiente naturale, effetti di inquinamento genetico e potenziale possibile trasmissione di agenti patogeni verso gli individui selvatici.

La localizzazione degli impianti di molluschicoltura che risultano più vulnerabili, coincide proprio con l'Alto Adriatico, l'area del Mediterraneo più sensibile ai cambiamenti climatici (Philippart et al., 2011; Torresan et al., 2012). Evidente è anche la criticità mostrata dagli impianti di piscicoltura d'acqua dolce, essenzialmente troticolture, localizzate sempre nelle regioni settentrionali, e che rappresentano la seconda voce produttiva dell'acquacoltura nazionale dopo la molluschicoltura.

L'alterazione del regime delle piogge e del deflusso delle acque, e l'aumento del **rischio di alluvioni e inondazioni** possono indurre danni strutturali agli impianti e ridurre la disponibilità di acqua dolce per la troticoltura, e gli impianti dovranno adeguarsi a limitare il prelievo e a sostenere un incremento dei costi economici per il prelievo. L'aumento della frequenza, ma soprattutto dell'intensità di **eventi meteorologici estremi** come alluvioni, trombe

d'aria e burrasche, può avere un impatto sulle attività di acquacoltura esercitate lungo la fascia costiera e in mare aperto. Le forti mareggiate potrebbero causare danni strutturali alle gabbie di allevamento, attraverso la rottura degli ormeggi, dei telai e delle reti, con conseguente perdita dei lotti allevati. La fuga dei pesci allevati, se significativa in termini di frequenza e di numero di animali, potrebbe avere un impatto ecologico e genetico sulle popolazioni naturali. Le perdite economiche, sia per i danni strutturali che per la perdite del materiale biologico, sarebbero molto rilevanti. Lo sviluppo di sistemi assicurativi potrebbe essere una misura adattativa per tutelare le imprese di acquacoltura dal rischio di fallimento e non scoraggiare futuri investimenti economici in questo settore.

Considerazioni conclusive

In conclusione si considera il grado di sensibilità della molluschicoltura e della piscicoltura ai fattori biofisici di impatto indotti dai cambiamenti climatici e la loro vulnerabilità.

La **molluschicoltura** è il segmento produttivo che sarà sottoposto a un maggior numero di pressioni, con impatti che possono essere rilevanti sulle attività produttive. Il suo grado di sensibilità agli effetti prodotti dai cambiamenti climatici sugli ecosistemi lagunari e costieri in cui le attività produttive sono esercitate è elevato. L'innalzamento del livello del mare potrà comportare l'inondazione costante di zone lagunari costiere e di siti dove la molluschicoltura è esercitata. L'acidificazione delle acque potrà influenzare la sopravvivenza dei primi stadi di sviluppo dei molluschi bivalvi, con impatti sulla disponibilità di seme selvatico necessario per l'avvio dei cicli produttivi. L'aumento della temperatura e delle malattie determineranno un impatto sulla crescita e sopravvivenza dei molluschi e quindi perdite economiche. I molluschi potranno essere esposti anche al rischio di contaminazione da "nuove" biotossine algali, potenzialmente pericolose per la salute umana, per l'entrata nel circuito Adriatico di nuove specie algali. Mentre per la mitilicoltura l'attuale tecnologia di allevamento sospeso di tipo long-line rappresenta un tipologia relativamente "meno vulnerabile", la venericoltura appare come il sistema di allevamento con minori possibilità di adattamento e quindi maggiormente "esposto" agli effetti delle variazioni climatiche. Tuttavia a fronte di significativi impatti dei cambiamenti climatici su questo sistema produttivo, la molluschicoltura ha una ridotta rilevanza nelle emissioni di gas serra, e contribuisce a fornire altresì servizi ecosistemici di cui sarebbe auspicabile tenere conto per preservare tale attività anche in condizioni ambientali meno favorevoli (FAO, 2010; Meyhoff Fry, 2012).

La piscicoltura intensiva in acque dolci, rappresentata in regione dalla **troticoltura** è un sistema che risentirà degli eventi meteorici estremi (alluvioni con perdita di infrastrutture e produzione), dell'innalzamento della temperatura dell'acqua e di una ridotta disponibilità di acque di buone qualità. Questo insieme di fattori avrà come conseguenza una possibile riduzione o marginalizzazione dei siti idonei per l'allevamento. Le troticolture di pianura saranno particolarmente influenzate da questi fattori di cambiamento. L'aumento della temperatura dell'acqua se non associato a riduzione nelle disponibilità idriche, potrebbe nel breve periodo essere interpretato come un fattore che migliora la performance di crescita, ma d'altro canto può ridurre o compromettere la performance riproduttiva degli animali e richiedere una rivisitazione delle pratiche gestionali. La trota iridea, specie d'acqua fredda, richiede per la riproduzione e l'allevamento delle prime fasi larvali, temperature comprese tra 6-12°C. Il carattere intensivo dell'allevamento ne determina anche una discreta sensibilità verso la maggiore incidenza e diffusione di malattie che potrebbe enfatizzarsi per effetto dei cambiamenti climatici. Sarà necessario controbilanciare questi effetti con strategie gestionali innovative oltre che attraverso una riduzione della densità di allevamento e l'impiego di sistemi a ricircolo idrico. La selezione di ceppi genetica di trota maggiormente tolleranti e la diversificazione delle specie

oggetto di allevamento rappresentano delle misure ulteriori per fronteggiare i cambiamenti prospettati sul medio periodo.

La **piscicoltura intensiva in acque marine**, condotta in vasche e bacini a terra e in gabbie in aree marino costiere e offshore, ha un grado di sensibilità ai cambiamenti climatici apparentemente meno elevato. Nel caso della piscicoltura a terra, trattandosi di impianti localizzati lungo la costa, i fattori di impatto più influenti sono il rischio di alluvioni e inondazioni e la variazione dei parametri fisico-chimici dell'acqua, nonché la qualità delle acque. Per gli allevamenti in gabbie, il maggiore impatto sarà determinato dall'aumento della frequenza degli eventi meteo marini estremi che possono causare perdite di materiale allevato.

La **piscicoltura estensiva**, basata su una moderna gestione degli ambienti naturali, risentirà anch'essa del cambiamento morfologico delle coste per l'innalzamento del livello del mare. Il grado di sensibilità complessiva degli allevamenti estensivi risulta elevato, in quanto praticati in ambienti vallivi e lagunari con un'elevata vulnerabilità naturale. L'innalzamento del livello del mare e le inondazioni cui sono soggette le aree Nord Adriatiche regionali ne minacciano l'esistenza stessa. Il cambiamento delle condizioni ambientali quali variazioni di temperatura, salinità, pH, concentrazione di ossigeno disciolto, contenuto di nutrienti, potrà influenzare i delicati equilibri ecologici di questi ambienti con effetti sulla fisiologia, fenologia e comportamento delle specie sfruttate, con conseguenze anche sulla produttività di questi ambienti. Misure di mitigazione di tali effetti in questi ambienti sono complesse e di non facile realizzazione anche in considerazione del complesso quadro normativo esistente a loro tutela.

3.7 Allevamento: produzione quanti-qualitativa del latte bovino

Mauro Spanghero - Università degli Studi di Udine

La produzione di latte delle bovine in regione nell'ultimo ventennio è aumentata poiché la popolazione è stata molto selezionata e sono migliorate le tecniche di allevamento. Si è registrato però un progressivo aumento della differenza tra produzione invernale ed estiva e quindi il tipico calo produttivo dovuto alla stagione calda sembra accentuarsi. Per il futuro si può, purtroppo, ipotizzare un aumento delle problematiche dello stress da caldo poiché alleveremo bovine sempre più produttive, ma molto sensibili al caldo estivo.

Sintesi

Nei nostri ambienti geografici i cambiamenti climatici e in particolare il riscaldamento terrestre possono accentuare le condizioni di stress termico nelle stagioni più calde, con ripercussioni sulle performance produttive e riproduttive degli animali e sul loro stato di benessere e di salute ("stress da caldo").

La finalità della presente indagine è stata quella di esaminare l'evoluzione della produzione di latte della popolazione bovina regionale nell'ultimo ventennio impostando un confronto tra produzione di latte nel periodo estivo e quello invernale. In collaborazione con la Associazione Allevatori del Friuli Venezia Giulia sono state esaminate le produzioni di latte ai controlli funzionali invernali ed estivi nel periodo 1997-2017. Nell'arco temporale considerato un indice climatico sintetico di temperatura-umidità (THI), misurato al centro del Friuli al controllo funzionale estivo, ha presentato una crescita tendenziale ed ha raggiunto, anche nella nostra regione, valori critici per quanto riguarda lo stress da caldo per le bovine da latte. La produzione di latte di entrambi i controlli è cresciuta nel ventennio considerato in quanto la popolazione di bovine è stata selezionata e sono migliorate le tecniche di allevamento, ma vi è stato un progressivo aumento della differenza tra produzione invernale ed estiva. Quindi il tipico abbassamento produttivo estivo dovuto alla stagione calda sembra accentuarsi. Anche per le cellule somatiche del latte, che sono indice di sanità della mammella e a forte influenza stagionale, la differenza estate-inverno è tendenzialmente aumentata a dimostrazione di una accresciuta sofferenza estiva degli animali. In conclusione, gli impatti negativi sulla produzione di latte nel periodo estivo possono in parte essere ascritti al peggioramento climatico documentato dall'aumento di THI, ma anche al miglioramento della popolazione bovina friulana, che è più produttiva del passato e quindi più sensibile agli stress da caldo.

Metodologia

Per la presente indagine è stato usato un dataset fornito dalla Associazione Allevatori Friuli Venezia Giulia (AAFVG) tratto dagli archivi dei controlli funzionali che vengono eseguiti nell'ambito della programmazione di miglioramento genetico del bestiame da latte (AIA, 2016). I controlli funzionali sono rilievi eseguiti da tecnici AAFVG con cadenza periodica negli allevamenti durante i quali vengono raccolti dati di tipo riproduttivo (parti, concepimenti, parentele, ecc…) e produttivi (rilievo di ogni singola bovina della produzione di mungitura e raccolta di un campione per l'analisi qualitativa del latte). L'AAFVG per il periodo 1997-2017 ha fornito i dati di controlli funzionali come media di allevamento in controllo e relativi ai mesi di febbraio e gennaio (periodo invernale) e luglio e agosto (periodo estivo). In particolare sono stati forniti la produzione totale del latte, la percentuale di grasso e proteina e il contenuto di cellule somatiche.

Per lo stesso arco temporale sono stati rilevati i dati medi di temperatura e umidità relativa rilevati nei mesi di gennaio-febbraio e luglio-agosto presso la stazione metereologica di Sant' Osvaldo (UD) e disponibili sul sito dell'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPA FVG Meteo, www.arpa.fvg.it).

Per ogni anno di indagine sono stati utilizzati i dati medi mensili di temperatura e umidità relativa per il calcolo del seguente indice derivato (Ravagnolo e coll., 2000):

$$THI= [1.8 * T – ((1-RH/100) * (T-14.3))] + 32$$

dove T=temperatura in °C e

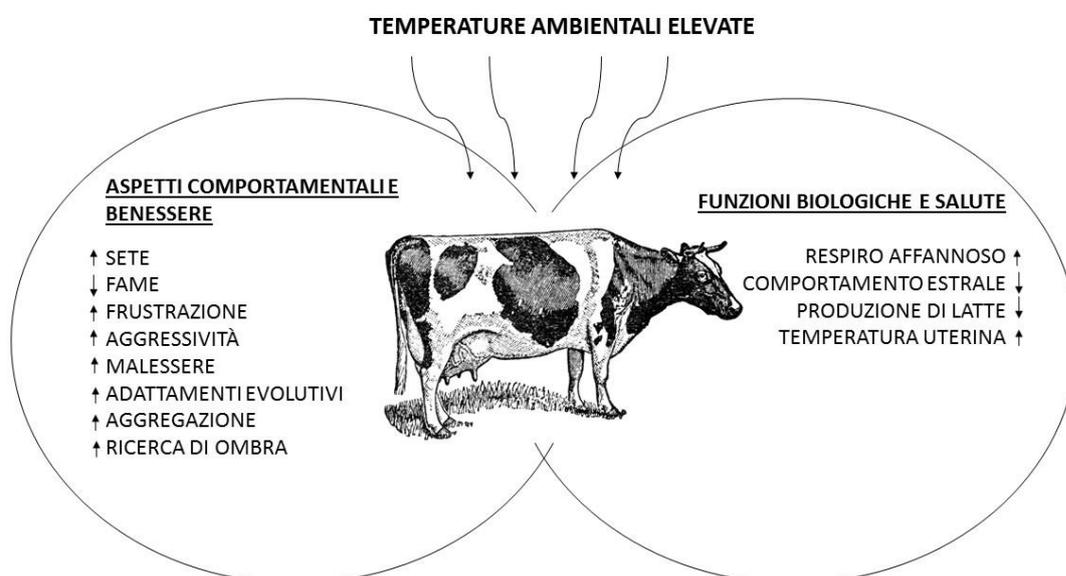
RH=umidità relativa in %.

Le medie annuali dei controlli funzionali e THI vengono illustrate in forma grafica riportando anche l'eventuale regressione con il tempo (anni).

Evidenze attuali

Nei nostri ambienti geografici i cambiamenti climatici e in particolare il riscaldamento terrestre possono accentuare le condizioni di stress termico nelle stagioni più calde, con ripercussioni sulle performance produttive e riproduttive degli animali e sul loro stato di benessere e di salute (Rojas-Downing et al., 2017; Nardone e coll., 2010). La zona di termoneutralità termica nelle bovine da latte, definibile come il range di temperatura ambientale nella quale gli animali presentano consumi energetici limitati per mantenere costante la temperatura corporea, sembra collocarsi tra -5 e 24 °C. Oltre i 24 ° C, e specialmente in condizioni di umidità relativa elevata, le bovine sono costrette ad adottare meccanismi fisiologici costosi per dissipare l'energia nell'ambiente e vanno incontro a condizioni di sofferenza. L'effetto negativo più diretto delle alte temperature si manifesta con la riduzione della ingestione alimentare come reazione fisiologica per contenere la quantità di energia da eliminare dall'organismo e questo compromette direttamente la produzione di latte. Parallelamente si ha un peggioramento della efficienza riproduttiva con alterazioni dell'estro, delle condizioni di benessere e di equilibrio comportamentale degli animali, che manifestano un malessere generale percepibile con l'aumento del ritmo respiratorio e della temperatura rettale (Fidler e van Devender, 2011). Le bovine manifestano alterazioni del comportamento sociale e risultano più aggressive e irrequiete (Polsky e von Keyserlingk, 2017) e va infine ricordato che le alte temperature ambientali sono condizioni favorenti lo sviluppo e la diffusione di agenti patogeni (Ozkan et al., 2016) e aumentano l'incidenza delle dismetabolie delle bovine. Complessivamente, tutte le descritte condizioni di alterazioni fisiologiche, produttive e comportamentali vengono sinteticamente definite come "stress da caldo".

Un indice climatico molto utilizzato a livello interazionale per caratterizzare le condizioni di stress termico è rappresentato dal "*Temperature-Humidity Index*" (THI), che viene calcolato dai valori di temperatura e umidità relativa ambientali. Per le bovine da latte venne inizialmente proposta una soglia di THI pari a 72 oltre la quale si riteneva di poter apprezzare una condizione di sofferenza e quindi di calo produttivo degli animali: tale valore corrisponde a 22, 25 o 28° C per umidità relative ambientali di 100, 50 e 20%, rispettivamente (Rovagnolo, 2000). Successivamente l'indice è stato rivisto con sperimentazioni che hanno utilizzato bovine da latte ad alta produzione che sono più sensibili allo stress termico e per le quali le condizioni di sofferenza inizierebbero in corrispondenza di un THI pari a 68 (Collier et al., 2012).

fig. 3.7.1 – Effetto dello stress termico sullo stato di benessere e produttivo della bovina da latte.

La finalità della presente indagine è stata quella di esaminare l'evoluzione della produzione di latte della popolazione bovina regionale nell'ultimo ventennio impostando un confronto tra produzione di latte nel periodo estivo e quello invernale. In particolare, l'indagine si è proposta di valutare se l'accentuarsi del picco caldo estivo negli ultimi anni possa aver aumentato la sofferenza estiva degli animali. A tale proposito è stato elaborato un archivio dati fornito dall' ARAF relativo a controlli di produzione di latte eseguiti nel periodo 1997-2017 negli allevamenti friulani in inverno (mesi di gennaio e febbraio) e in estate (mesi di luglio-agosto). Complessivamente, sono stati oggetto di indagine circa 22 mila allevamenti e 850 mila bovine in inverno e circa 17 mila allevamenti e 650 mila bovine in estate.

Per il periodo considerato è stato calcolato l'indice di THI utilizzando le medie mensili di temperatura e umidità rilevate in una stazione meteorologica sita in una località centrale della regione Friuli Venezia Giulia. Va segnalato che l'indice, poiché calcolato da medie mensili che sono poi state mediate tra due mesi per ottenere il valore estivo e invernale, probabilmente differisce dalla condizione in cui sono state calcolate le soglie per individuare le condizioni di stress delle bovine (ad es. variazione del THI giornaliero e rilievo degli effetti sulla produzione a 24-48 ore successive). Pertanto il THI è stato calcolato per descrivere l'evoluzione climatica nell'ultimo ventennio e fornire una indicazione di massima delle condizioni di criticità climatica per il bestiame da latte della nostra regione. Come si rileva dalla fig. 3.7.2 a fronte di un valore di THI basso e piuttosto stabile della stagione invernale (circa 42) l'indice aumenta durante il periodo estivo fino a valori di 68-72 e quindi raggiunge le soglie indicate dalla letteratura internazionale alle quali inizia a manifestarsi lo stress da caldo. Inoltre nel ventennio oggetto di indagine si registra un tendenziale aumento del valore di THI: in particolare negli ultimi 10 anni il THI è stato maggiore di 72 in sette annate, mentre nella decade precedente solamente in 1 annata si è raggiunto un valore simile. Pertanto da questi dati si può ricavare che le condizioni estive raggiungono anche nella nostra regione valori critici per quanto riguarda lo stress da caldo per le bovine da latte.

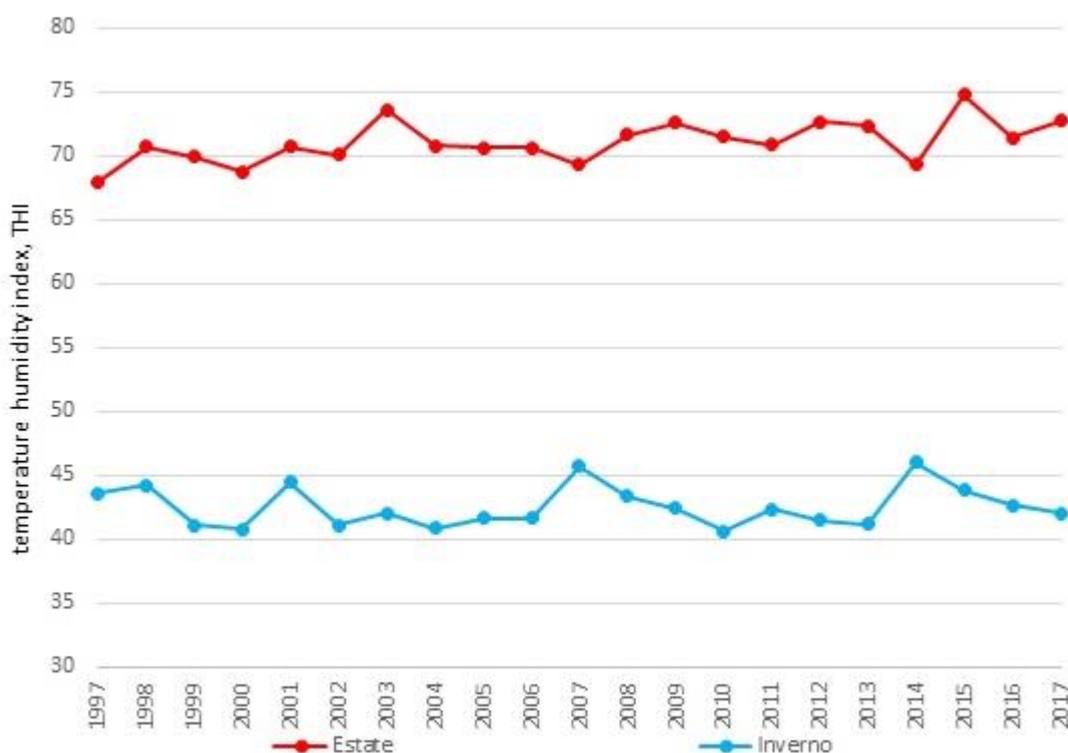
fig. 3.7.2 – Andamenti dell'indice climatico "Temperature-Humidity Index" (THI) negli anni 1997-2017 calcolato sulla base dei valori di temperatura e umidità relativa rilevati presso la stazione metereologica di Sant'Osvaldo (ARPA FVG Meteo) nei mesi di gennaio-febbraio (inverno) e luglio-agosto (estate).

La produzione di latte nel ventennio considerato è aumentata in maniera regolare complessivamente di circa il 20% (fig. 3.7.2). Questo risultato è sicuramente dovuto alla innovazione delle tecniche di alimentazione e di allevamento e alla continua azione di miglioramento genetico, ma ha avuto sicuramente un forte effetto il processo di uscita dalla produzione di numerosi allevamenti di piccola dimensione e di basso livello produttivo. Complessivamente quindi la popolazione di bovine da latte regionale presenta caratteristiche produttive molto più elevate di quelle di vent'anni fa ed in generale gli animali più produttivi sono più sensibili alle condizioni di stress termico. Si consideri al riguardo che autori statunitensi hanno misurato un abbassamento della soglia di temperatura ambientale di inizio dello stress da caldo di 5 ° C comparando bovine che producevano 35 oppure 45 kg /d di latte (Berman, 2005). Pertanto il rapporto tra produzione estiva e invernale, che dalla fig. 3.7.3 tende a decrescere in maniera significativa durante il ventennio considerato (R^2= 0.34), può in parte essere ascritto al peggioramento climatico documentato dall'aumento di THI: tuttavia l'impatto sulla produzione di latte va interpretato nel contesto di miglioramento genetico della popolazione bovina friulana, che è più produttiva del passato, ma meno tollerante agli stress da caldo.

fig. 3.7.3 – Produzione di latte (media di allevamento) rilevato ai controlli funzionali invernali ed estivi in FVG nel periodo 1997-2017

Nelle fig. 3.7.4 e 3.7.5 sono rappresentati gli andamenti dei tenori di proteina e grasso del latte. Per entrambi si evidenzia un atteso peggioramento (calo del valore percentuale) passando dal periodo invernale a quello estivo e quindi lo stress da caldo ha un effetto non solo sulla produzione totale di latte ma anche sulla diluzione dei suoi principali componenti. Per il grasso non ci sono particolari cambiamenti negli ultimi vent'anni, mentre per quanto riguarda la proteina si osserva un miglioramento del tenore nel corso degli anni, che si è realizzato sia nei periodi invernali che in quelli estivi. La proteina è uno dei principali fattori di qualità del latte in funzione della sua trasformazione casearia e il suo aumento va ascritto all'applicazione di attenti programmi di miglioramento genetico e alimentare.

Il contenuto di cellule somatiche del latte è un parametro igienico sanitario che esprime l'igienicità della mammella e le condizioni di ottimale funzionalità secretoria della ghiandola. In condizioni di stress e infettive il tessuto mammario libera nel latte, oltre a cellule epiteliali di sfaldamento, anche linfociti e macrofagi come reazione di difesa. Negli anni considerati si è riscontrato (fig. 3.7.6) un leggero trend di crescita sia per l'estate che per l'inverno, ma il rapporto estate/inverno ha manifestato una moderata tendenza all'aumento che può essere indicativo di una aggravata sofferenza estiva conseguente ad un aumento dello stress da caldo.

fig. 3.7.4 – Percentuale di grasso nel latte rilevata ai controlli funzionali invernali ed estivi in FVG nel periodo 1997-2017

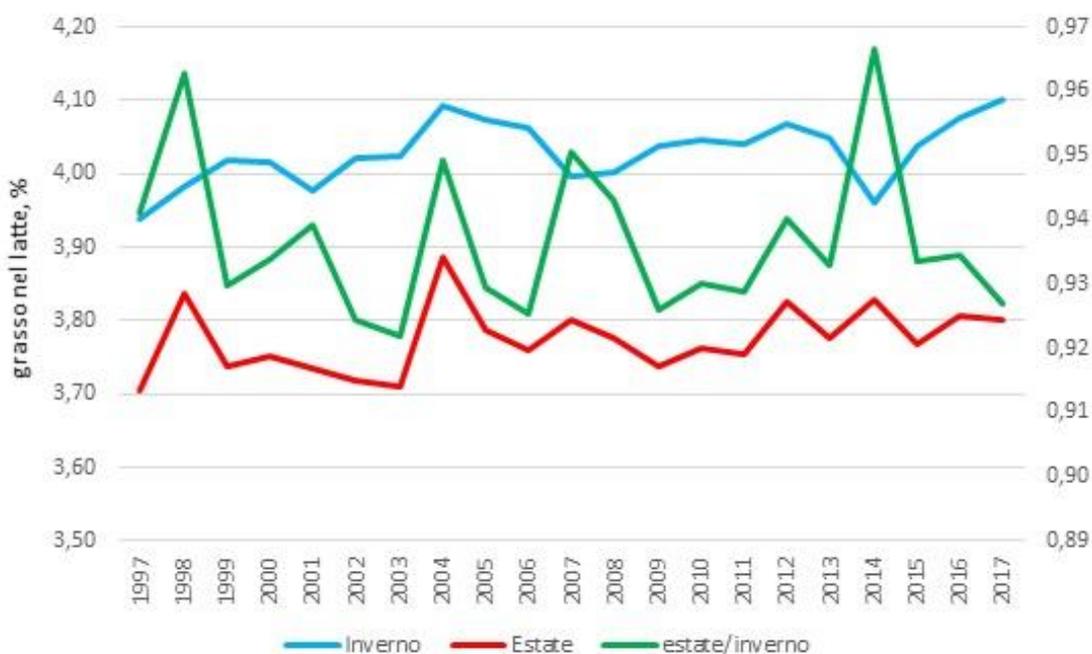



fig. 3.7.5 – Percentuale di proteina nel latte rilevata ai controlli funzionali invernali ed estivi in FVG nel periodo 1997-2017

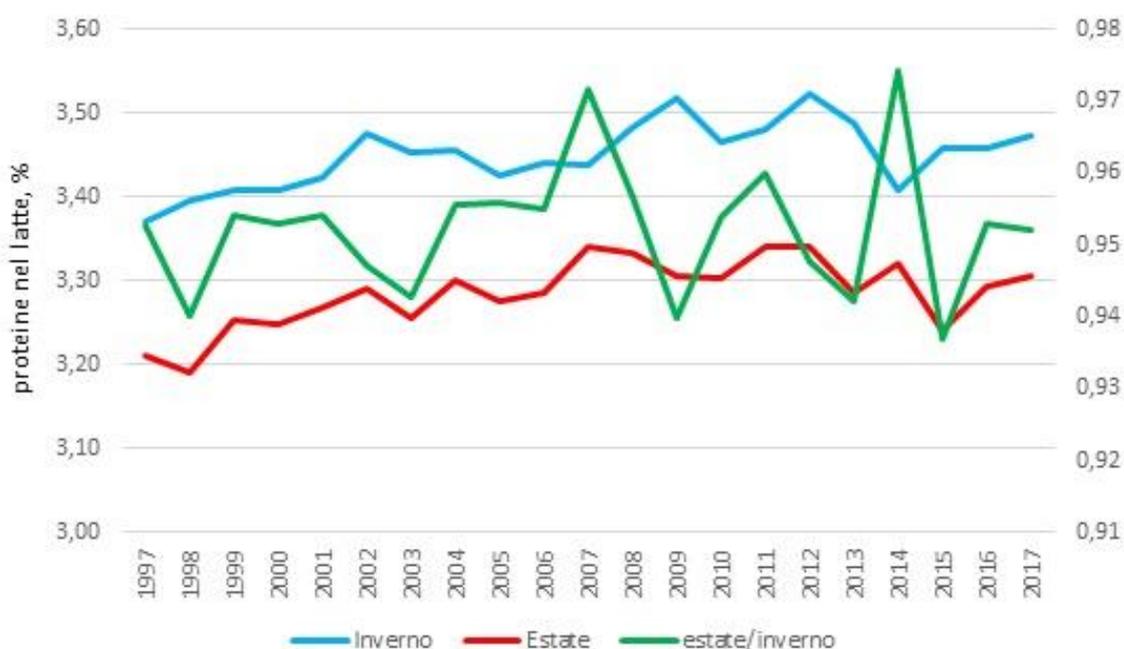
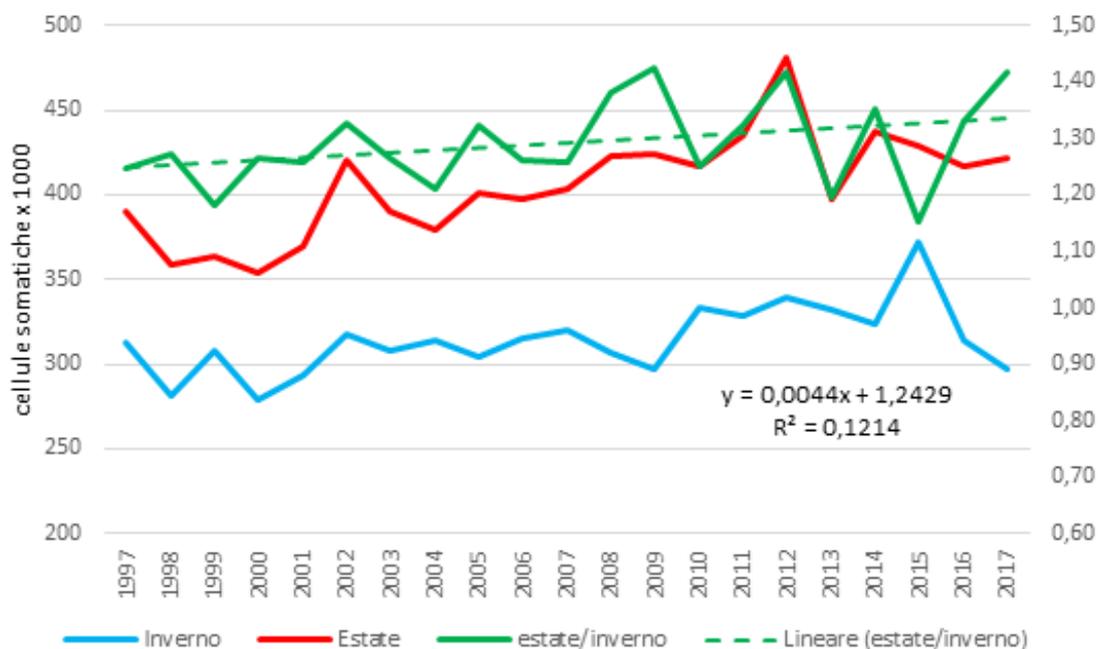



fig. 3.7.6 – Numero di cellule somatiche nel latte rilevato ai controlli funzionali invernali ed estivi in FVG nel periodo 1997-2017

Impatti futuri e considerazioni conclusive

Nell'arco temporale considerato l'indice climatico sintetico di temperatura-umidità THI ha presentato un tendenziale trend di crescita ed ha raggiunto valori critici per quanto riguarda lo stress da caldo per le bovine da latte. La produzione di latte è cresciuta nel ventennio considerato e vi è stato un progressivo aumento della differenza tra produzione invernale ed estiva: quindi il tipico abbassamento produttivo estivo dovuto alla stagione calda sembra accentuarsi.

Per il futuro si può, purtroppo, ipotizzare l'accentuarsi delle problematiche dello stress da caldo nei mesi estivi per il progressivo miglioramento produttivo della popolazione bovina allevata che diviene sempre più sensibile al caldo. Il fenomeno risulterebbe ulteriormente aggravato anche dal perdurare dei mutamenti climatici, come quelli che hanno determinato gli aumenti del THI estivo nell'ultimo ventennio.

Sarà quindi necessario prevedere azioni di investimento in tecnologie di protezione degli animali dal caldo estivo negli allevamenti (impiantistica, alimentazione, ricoveri, etc.) per salvaguardare il benessere delle bovine e scongiurare un peggioramento della produzione quanti-qualitativa del latte bovino.

3.8 Produzione forestale: impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste: effetti sull'accrescimento di piceo-abieteti della val Pesarina

Giorgio Alberti, Mattia Cleva - Università degli Studi di Udine

I dati dendrocronologici normalizzati per l'età delle piante campionate hanno evidenziato una diversa sensitività delle specie al cambiamento climatico. In particolare, l'abete bianco ha evidenziato un significativo aumento dell'accrescimento, mentre l'abete rosso ha mostrato una diminuzione dell'accrescimento, sebbene poco significativa.

Sintesi

Diversi studi hanno riportato un aumento della produttività primaria netta (NPP) delle foreste in Europa, nel Nord America e nei tropici nel corso del secolo scorso. Meno conosciute sono le cause di questo aumento e, cosa più importante, le conseguenze sul funzionamento delle foreste. In particolare, è stato evidenziato come gli ecosistemi forestali siano molto sensibili al cambiamento climatico con particolare riferimento alle modificazioni della temperatura in ambiente alpino e delle precipitazioni in ambiente appenninico e mediterraneo.

Il presente studio ha voluto verificare l'esistenza di relazioni tra l'accrescimento di piceo-abieteti della Val Pesarina e le variazioni di temperatura e piovosità registrate nell'ultimo secolo mediante il confronto tra serie dendrocronologiche e serie climatiche. I dati raccolti hanno evidenziato un significativo aumento della temperatura media annua nell'ultimo secolo (+0.03°C anno^{-1}), ma nessuna variazione significativa delle precipitazioni: il clima nell'area di studio è diventato più caldo e secco con ondate di calore nel 2003, 2005 e nel 2007, che sono stati anni caratterizzati da estati molto calde e secche in tutta Europa. I dati dendrocronologici normalizzati per l'età delle piante campionate hanno evidenziato una diversa sensitività delle specie al cambiamento climatico. In particolare, l'abete bianco ha evidenziato un significativo aumento dell'accrescimento, mentre l'abete rosso ha mostrato una diminuzione dell'accrescimento, sebbene non significativa.

Metodologia

Lo studio è stato condotto all'interno della particella forestale 8a del bosco del Vallone in Val Pesarina (UD). Il soprassuolo è ascrivibile ai piceo-abieteti dei suoli mesici montani, come la gran parte dei boschi che si trovano sul versante Nord della valle. Queste formazioni sono caratterizzate dalla presenza di abete bianco e di abete rosso che a volte può prevalere o addirittura essere puro in quanto favorito dall'uomo. A quote variabili tra i 1000 e 1400 m, il piceo-abieteto dei suoli mesici cambia, almeno in parte, aspetto arricchendosi nel piano arboreo, seppure in maniera sporadica, della presenza del faggio e, in corrispondenza di piccoli avvallamenti, dell'acero di monte. Il

substrato geologico è costituito da depositi alluvionali e calcari marnosi, marne e gessi del Permiano superiore. Il suolo è rappresentato da terre brune forestali a tratti di notevole potenza eutrofica, molto fresche con humus di tipo Mull da lombrichi e gemellare.

All'interno della particella considerata, sono state scelte casualmente 10 piante di abete rosso e 10 piante di abete bianco nel piano dominante e si è proceduto al loro abbattimento per la stima dell'accrescimento longitudinale, diametrale e del volume secondo il metodo dell'analisi del fusto (La Marca, 2017). Tutte le piante presentavano un buon portamento con chiome ben sviluppate e fusto diritto senza evidenti anomalie che avrebbero potuto portare a delle discordanze nei valori rilevati. Una volta atterrata e sramata ciascuna pianta, il fusto è stato suddiviso in toppi attraverso una sezionatura perfettamente normale all'asse del fusto. Dalla base di ogni toppo, è stata prelevata una rotella di 4-5 cm di spessore. Ogni rotella è stata numerata con il numero della pianta e l'altezza a cui è stata prelevata. Una volta in laboratorio, una faccia di ciascuna rotella è stata levigata per rendere ben evidenti gli anelli di accrescimento. I dati riportati nel presente studio sono relativi alle rotelle prelevate alla base del fusto.

La determinazione dell'età di ciascuna rotella e dello spessore degli anelli è stata eseguita mediante DENDROTAB 2003 (© Walesch Electronic) abbinato ad un microscopio binoculare e con il software T-Tools (© Walesh Electronic). Le letture sono state effettuate lungo due direzioni per ciascuna rotella e quindi è stata fatta la media delle misure ottenute. Poiché l'accrescimento diametrale misurato è funzione non solo delle condizioni climatiche, ma anche dell'età della pianta, si è proceduto a eliminare l'effetto dell'età seguendo la metodologia proposta da Gallucci e Urbinati (2009): i valori di accrescimento misurati sono stati riportati in un grafico in funzione dell'età e quindi interpolati utilizzando una funzione polinomiale di quinto grado. Quindi, è stato calcolato un indice di accrescimento dato dal rapporto tra accrescimento misurato e il valore teorico derivante dalla curva. Se l'indice è maggiore di uno, allora l'accrescimento è stato maggiore di quello teorico, se è inferiore a tale, allora l'incremento è stato minore.

Non essendo presente una stazione meteorologica in Val Pesarina con una serie storica di dati termo-pluviometrici sufficientemente lunga, i dati di precipitazione e di temperatura sono stati raccolti dalla stazione meteo di Forni Avoltri (UD) e vanno dal 1933 al 2008. Tali dati possono essere considerati validi anche per l'area di studio considerata in quanto le due vallate sono adiacenti e hanno caratteristiche ambientali molto simili.

Inizialmente, sono stati costruiti dei grafici termo-pluviometrici per determinare l'esistenza di possibili andamenti temporali della temperatura o delle precipitazioni all'interno del periodo considerato. In seguito è stato calcolato l'indice climatico proposto da Barber (2000). Questo indice si basa sulla temperatura media del periodo vegetativo (aprile-agosto) e sulla precipitazione media mensile. Sulla base di questi dati, è stata calcolata la temperatura normalizzata (Tnorm), data dal rapporto tra la temperatura media del periodo vegetativo di un singolo anno e la media di tutte le temperature da aprile ad agosto della serie storica considerata. Allo stesso modo è stata calcolata la precipitazione normalizzata (Pnorm), ricavata dal rapporto tra la precipitazione media mensile di un singolo anno e la precipitazione media mensile riferita all'intero periodo. L'indice climatico di Barber è quindi dato dall'equazione:

$$I = T_{norm} - P_{norm}$$

Un valore dell'indice maggiore di zero indica che l'anno è stato caldo e secco, in caso contrario (I<0) l'anno è stato freddo e umido.

Evidenze attuali

La temperatura media annua nel periodo considerato (1933-2008) è aumentata significativamente con un tasso di 0.03° anno-1, passando da 6.6°C nel 1933 a 10.6°C nel 2008 ($p<0.0001$; fig. 3.8.1). Non è stata riscontrata alcuna variazione significativa per quanto riguarda l'escursione termina annua (massimo – minimo assoluto) che è rimasta pressoché costante nel periodo considerato intorno ai 19.6°C, indicando un clima nettamente continentale. A differenza della temperatura, le precipitazioni annue non hanno mostrano alcun andamento significativo all'interno del periodo ($p>0.05$), ma si sono mantenute abbastanza stabili intorno a 1400 mm anno-1, sebbene vi siano stati alcuni anni particolarmente piovosi (2420 mm nel 1960) o particolarmente secchi (820 mm nel 1943).

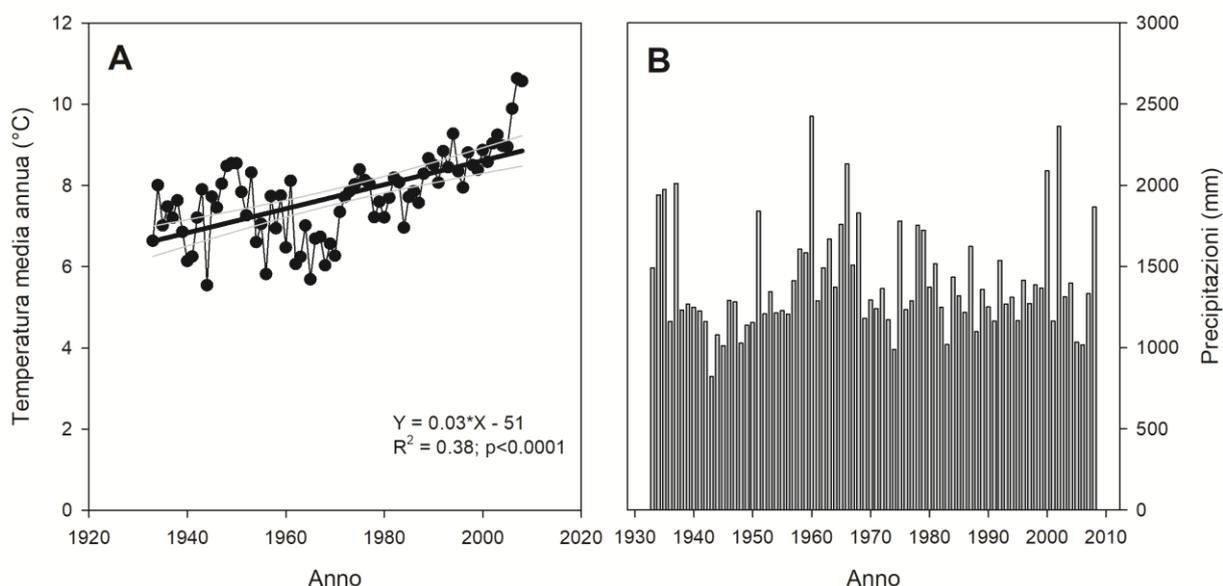
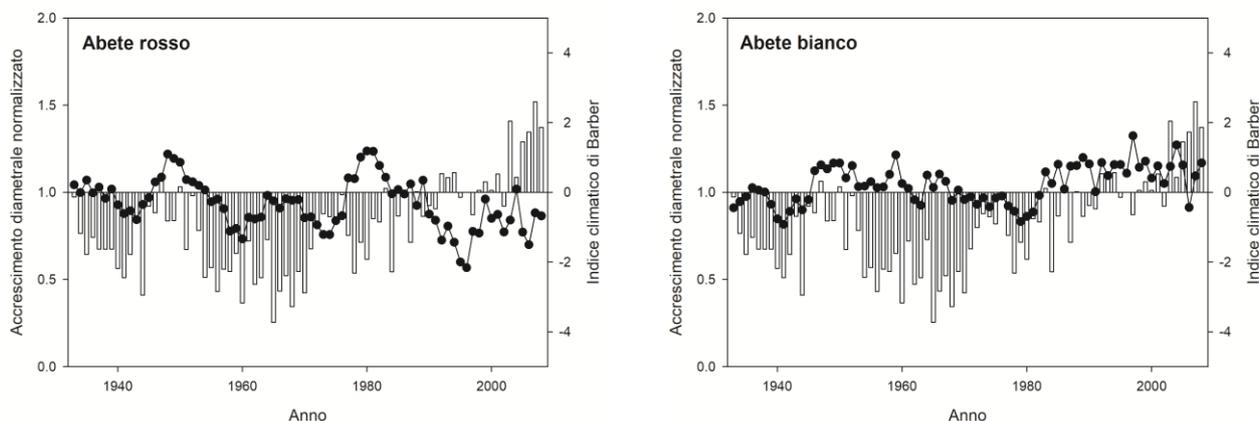
fig. 3.8.1 – Andamento della temperature media annua (A) e della precipitazione annua (B) alla stazione metereologica di Forni Avoltri nel periodo 2003-2008. Nel pannello A è anche riportata la regressione tra temperatura media annua ed anno con relativa equazione. Le linee in grigio rappresentano l'intervallo di confidenza al 95%.

Un'analisi più approfondita dei dati metereologici per il periodo considerato relativi alla stagione vegetativa (Indice climatico di Barber; fig. 3.8.2) ha messo in evidenza come gli anni antecedenti al 1990 siano stati caratterizzati da stagioni vegetative generalmente fredde ed umide (valore dell'indice inferiore a zero), mentre la fine del secolo scorso e l'inizio del nuovo secolo abbiano registrato stagioni vegetative più calde e leggermente meno piovose (valore dell'indice maggiore di zero). Le piante considerate nel presente studio avevano al momento del campionamento (2008) un'età media di 119±7 anni per l'abete bianco e di 113±9 per l'abete rosso. Per quanto riguarda l'accrescimento diametrale (fig. 3.8.2), l'abete rosso e l'abete bianco hanno mostrato andamenti simili fino agli inizi degli anni '80 del secolo scorso per poi cominciare a differenziarsi: l'abete bianco ha mostrato un generale aumento del suo accrescimento (indice di accrescimento > 1), mentre l'abete rosso ha mostrato una generale diminuzione (indice di accrescimento <1).

fig. 3.8.2 – Andamento dell'indice climatico di Barber (barre verticali) e dell'accrescimento medio normalizzato per l'abete rosso e per l'abete bianco della Val Pesarina nel periodo 1933-2008. Valori negativi dell'indice climatico indicano stagioni vegetative fredde e piovose, valori positivi indicano stagioni vegetative calde e secche. Valori maggiori di 1 dell'accrescimento normalizzato indicano un accrescimento maggiore rispetto a quello teorico legato solo all'età della pianta.

Infatti, è stata determinata una correlazione positiva significativa tra accrescimento e indice climatico di Barber per l'abete bianco ($p<0.001$): all'aumentare delle condizioni di caldo e secco durante la stagione vegetativa è corrisposto un significativo aumento dell'accrescimento. Al contrario, l'abete rosso ha mostrato una correlazione negativa anche se non significativa ($p=0.10$).

Nel caso dell'abete bianco, è poi stato determinato un modello empirico che legasse l'accrescimento normalizzato alle condizioni ambientali di temperatura e piovosità durante la stagione vegetativa (indice di Barber) e alla concentrazione media di CO2 in atmosfera. Il modello ha messo in evidenza come l'accrescimento di questa specie sia influenzato positivamente dalla concentrazione di CO2 dell'atmosfera e da maggiori temperature e minore piovosità durante il periodo vegetativo (fig. 3.8.3).

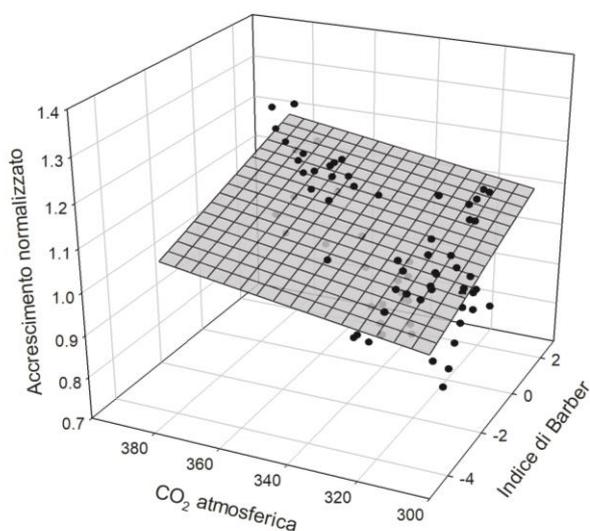



fig. 3.8.3 – Andamento dell'accrescimento normalizzato dell'abete bianco in funzione dell'indice climatico di Barber (I; valori positive indicano stagioni vegetative calde e secche; valori negativi indicano stagioni vegetative fredde e piovose) e della concentrazione media di CO2 in atmosfera. Accrescimento = 0.68 + 0.02 * I + 0.001 * CO2; R2=0.22; p<0.001.

Considerazioni conclusive e impatti futuri

Il clima anche in Val Pesarina è diventato più caldo e secco negli ultimi decenni con un aumento delle ondate di calore nel periodo estivo, analogamente a quanto segnalato in altre zone dell'Europa (Ciais et al., 2005; Reichstein et al., 2007; Piao et al., 2008). Gli impatti sulla foresta legati a questi cambiamenti del clima e a quelli previsti per il futuro dipendono innanzitutto dalla composizione specifica delle formazioni forestali e dalle loro caratteristiche strutturali ed edafiche.

Precedenti studi hanno riportato una riduzione dell'accrescimento dell'abete bianco in popolamenti coetanei appenninici (Gallucci e Urbinati, 2009) e in popolamenti in Slovenia (Bigler et al., 2004), nei Vosgi francesi (Becker e Levy, 1989), a Vallombrosa (Sibilia 1952; De Philippis, 1958; Corona, 1983) ed in Casentino (Sibilia, 1952), situazioni in cui mesi estivi molto caldi attenuano l'azione positiva determinata dalle precipitazioni primaverili ed estive (Corona, 1983; Romagnoli e Schirone, 1992; Gambetti et al., 2000; Gentilesca e Todaro, 2008). Al contrario, in stazioni più piovose o comunque dove il rifornimento idrico è sufficiente, l'accrescimento è controllato in modo significativo dalle temperature di agosto (Manetti e Cutini, 2006). Pertanto, l'aumento della temperatura media della stagione vegetativa e, nel contempo, un sempre sufficiente rifornimento idrico sembrano aver favorito, e probabilmente continueranno a favorire, l'accrescimento dell'abete bianco in Val Pesarina. La riduzione di accrescimento dell'abete rosso è, al contrario, legata all'aumento della temperatura media annua e della temperatura durante la stagione vegetativa. Infatti, l'optimum per questa specie (temperatura media annua) è tra i 3 ed i 6-7°C (Bernetti, 1998). Pertanto, è possibile ipotizzare che il riscaldamento in atto potrà determinare una riduzione dell'accrescimento di questa specie ed una sua graduale sostituzione con l'abete bianco ed il faggio (Hanewinkel, 2012).

3.9 Impatti dei cambiamenti climatici sulle foreste: eventi di disseccamento e mortalità degli alberi a seguito di episodi di aridità

Andrea Nardini - Università degli Studi di Trieste

Gli ultimi decenni hanno proposto una serie di stagioni estive particolarmente calde e aride che in alcuni casi hanno innescato fenomeni di deperimento e mortalità degli alberi, con impatti diversi sulle diverse specie e potenziali conseguenze per vegetazione e biodiversità. Lo studio dei meccanismi di trasporto dell'acqua nelle piante ha permesso di identificare, per le diverse specie di alberi, soglie fisiologiche di vulnerabilità ad eventi di aridità anomala: queste soglie possono aiutarci a prevedere l'impatto dei cambiamenti climatici sulle foreste nonché a selezionare specie e genotipi (varietà) maggiormente adatti a scenari climatici futuri, e quindi preferibili per pianificare interventi di riforestazione in ambienti naturali o urbani.

Sintesi

Studi recenti hanno riportato un aumento degli eventi di disseccamento e mortalità degli alberi nelle foreste a livello globale (Allen et al. 2010; Hember et al. 2017). Tali eventi sono stati associati ad ondate di calore e periodi di aridità anomala che hanno indotto nelle piante condizioni di stress idrico irreversibile e spesso letale. Questi fenomeni hanno interessato numeri variabili di specie e individui nei diversi ecosistemi forestali, causando in alcuni casi il disseccamento dei rami terminali o, in quelli più gravi, la morte dell'intero albero. Studi recenti hanno identificato alcune delle principali cause di mortalità degli alberi in condizioni di stress idrico intenso e/o prolungato, permettendo di definire parametri fisiologici potenzialmente predittivi della vulnerabilità di diverse specie ai cambiamenti climatici (Adams et al. 2017; O'Brien et al. 2017). Eventi di disseccamento delle chiome e di mortalità degli alberi hanno interessato anche l'area del Carso durante l'ultimo decennio e sono stati documentati da una serie di studi scientifici che evidenziano come la vulnerabilità ai cambiamenti climatici sia specie-specifica, ma venga anche influenzata da fattori quali la competizione per l'acqua tra le diverse piante e l'accesso differenziale a risorse idriche da parte degli apparati radicali (Nardini et al. 2013; Nardini et al. 2016; Petrucco et al. 2017).

Lo stress idrico causa danni al sistema di trasporto dell'acqua delle piante

Le piante perdono grandi quantità di acqua verso l'atmosfera. Alberi di medie/grandi dimensioni possono utilizzare da 100 a 500 litri di acqua al giorno, con valori superiori ai 1000 litri per alcuni grandi alberi di foreste tropicali (Larcher 2003). Questo grande dispendio idrico deriva dalla natura stessa delle piante terrestri, organismi fotoautotrofi che utilizzano l'energia solare per sintetizzare carboidrati a partire da diossido di carbonio (CO_2) atmosferico. Le piante assorbono CO_2 dall'atmosfera, dove tuttavia questo gas si trova in concentrazioni limitate. Da ciò deriva la necessità per la pianta di attuare intensi scambi diffusivi di gas con l'atmosfera. Tali scambi

avvengono prevalentemente attraverso gli stomi, piccoli pori localizzati sull'epidermide fogliare, il cui livello di apertura può essere regolato. L'apertura degli stomi garantisce l'ingresso di CO_2, ma comporta inevitabilmente grandi perdite di acqua che evapora dalle cellule fogliari e si disperde poi nell'atmosfera in forma di vapore acqueo, in un processo noto come traspirazione. Per mantenere un adeguato stato di idratazione, le piante devono reintegrare l'acqua persa per traspirazione con eguali volumi di acqua estratti dal suolo dall'apparato radicale e trasportati alle foglie attraverso i tessuti vascolari legnosi. Questi sono costituiti da lunghe serie di cellule morte a maturità (quindi delimitate solamente dalla parete cellulare) che vanno a formare un sistema di piccole tubature (note genericamente come condotti xilematici) che connettono le radici alle foglie. In virtù delle peculiari proprietà dell'acqua e delle caratteristiche micro-morfologiche delle cellule della foglia, l'evaporazione stessa a livello fogliare genera forze di tensione (= pressione negativa) nell'acqua contenuta nei condotti xilematici. Le forze di coesione tra molecole e le caratteristiche dei condotti xilematici permettono all'acqua di rimanere liquida anche se sottoposta a pressioni negative, e fanno sì che la tensione si propaghi sino all'apparato radicale, permettendo l'assorbimento di acqua dal suolo. Tale meccanismo, noto come Teoria della Tensione-Coesione (Tyree & Zimermann 2002), permette alle piante di assorbire e trasportare grandi quantità di acqua con minimo dispendio energetico. Tuttavia, la natura stessa del meccanismo comporta dei rischi in condizioni di stress idrico, cioè in situazioni di aridità del suolo spesso accompagnate da temperature dell'aria elevate che da un lato riducono la disponibilità di acqua a livello radicale, e dall'altro aumentano l'evaporazione e quindi la perdita di acqua per traspirazione. In questo caso, l'eccessiva diminuzione della pressione nei condotti xilematici può portare all'ingresso di aria negli stessi. L'aria, propagandosi nel sistema di trasporto, determina una condizione nota come embolia xilematica che comporta la perdita parziale o totale della capacità di trasporto dell'acqua nella pianta (conduttanza idraulica), portando quindi alla disidratazione parziale o al disseccamento totale. Vari studi hanno indicato che la soglia letale di perdita di conduttanza idraulica rispetto alla condizione di piena idratazione è pari a circa 80% per le Angiosperme legnose (Urli et al. 2013), e circa 50% per le Gimnosperme (Brodribb & Cochard 2009). Le diverse specie sono tuttavia diversamente sensibili al fenomeno dell'embolia xilematica, e quindi diversamente resistenti a fenomeni di stress idrico intenso e prolungato. La vulnerabilità delle piante all'embolia xilematica viene quantificata attraverso cosiddette curve di vulnerabilità, basate su misure della diminuzione progressiva di conduttanza idraulica al diminuire della pressione dell'acqua nei condotti xilematici. Da tali curve è possibile ricavare un indice sintetico di vulnerabilità noto come P_{50}, definito come il valore di pressione xilematica (espresso in –MPa) che causa una riduzione del 50% nell'efficienza di trasporto dell'acqua nella pianta (Choat et al. 2012).

Fenomeni di disseccamento delle chiome e mortalità degli alberi nel Carso

Nel corso dell'estate 2012, caratterizzata a livello nazionale e locale da temperature più elevate della media e precipitazioni molto inferiori alla media, è stato documentato l'esteso disseccamento, già a partire dalla fine di luglio e inizio agosto, delle chiome di varie specie arboree e arbustive decidue nella zona del Carso triestino. Tra le specie maggiormente interessate dal fenomeno vanno ricordate *Ostrya carpinifolia* Scop., *Quercus pubescens* Willd., *Fraxinus ornus* L., *Acer campestre* L. (Fig. 3.9.1). Al contrario, altre specie hanno mostrato la capacità di resistere allo stress idrico intenso e prolungato, mantenendo la vitalità della chioma per tutto il periodo estivo. Tra queste vanno citate *Acer monspessulanum* L. e *Prunus mahaleb* L.. Nel mese di Agosto 2012 è stato condotto un rilievo volto a definire la percentuale di individui interessati da disseccamento anomalo nelle popolazioni di 6 Angiosperme legnose decidue. I risultati sono stati comparati con i valori di P_{50} delle singole specie, nonché con alcune caratteristiche morfo-anatomiche, quali la densità del legno (Nardini et al. 2013). Questo parametro è infatti

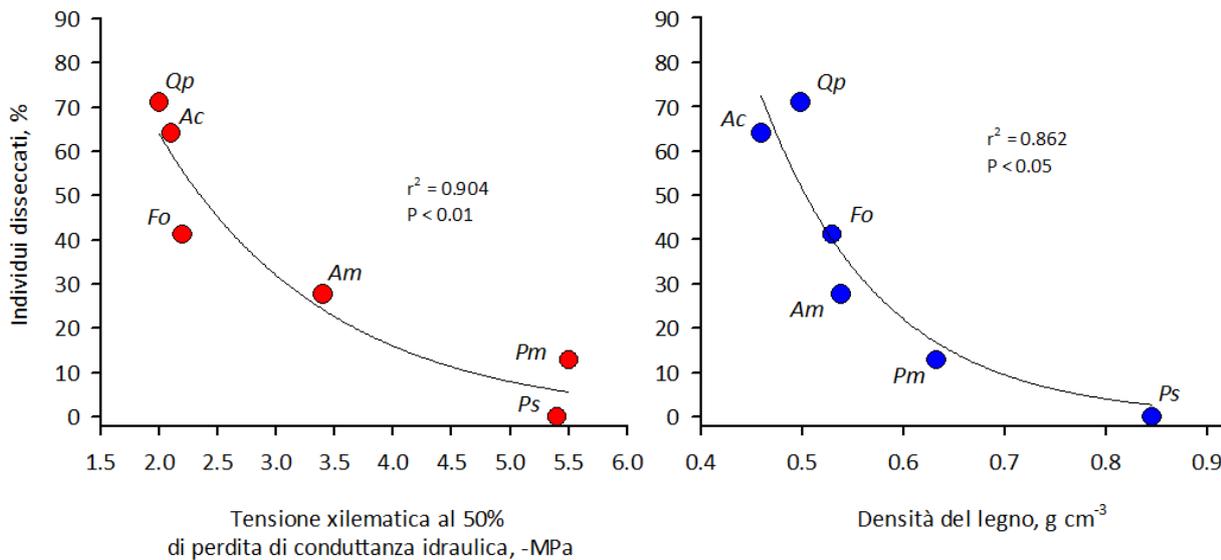
generalmente correlato alla vulnerabilità all'embolia xilematica. Tale relazione deriva dal fatto che specie con condotti xilematici più piccoli, più numerosi e con pareti cellulari più spesse (fattori che determinano un aumento della densità del legno) sono generalmente meno vulnerabili all'embolia xilematica e ai suoi effetti negativi (Hacke et al. 2017).

Le analisi hanno dimostrato come la percentuale di individui disseccati sia notevolmente diversa nelle diverse specie, andando dal 70% delle popolazioni di *Q. pubescens* e *A. campestre*, sino a meno del 15% in *P. mahaleb* e *P. spinosa* (Fig. 3.9.2). In ciascuna specie, gli individui disseccati erano quelli nei quali la perdita di conduttanza idraulica aveva superato la soglia del 70-80%. Le percentuali specie-specifiche di individui disseccati erano correlate alla rispettiva vulnerabilità all'embolia xilematica così come alla densità del legno, che emergono quindi come importanti parametri utili per valutare il rischio di disseccamento o mortalità di diverse specie arboree in caso di eventi anomali di aridità, con conseguenti effetti sulla biodiversità. Va rilevato tuttavia come l'indicazione più affidabile derivi dalla misura fisiologica della vulnerabilità (P_{50}) piuttosto che da quella morfologica, in quanto quest'ultima è solo in parte correlata alle caratteristiche dei condotti xilematici. Inoltre, tali caratteristiche non sono sempre collegate in maniera univoca alla vulnerabilità all'embolia xilematica (Gleason et al. 2016). Tutto ciò rende la densità del legno un utile indicatore generico di vulnerabilità delle diverse specie allo stress idrico, che va tuttavia confermato attraverso specifiche analisi di carattere fisiologico.

fig. 3.9.1 – Chiome di Fraxinus ornus (a), Ostrya carpinifolia (b) e Quercus pubescens (c) disseccate durante l'estate 2012 (Foto: A. Nardini).

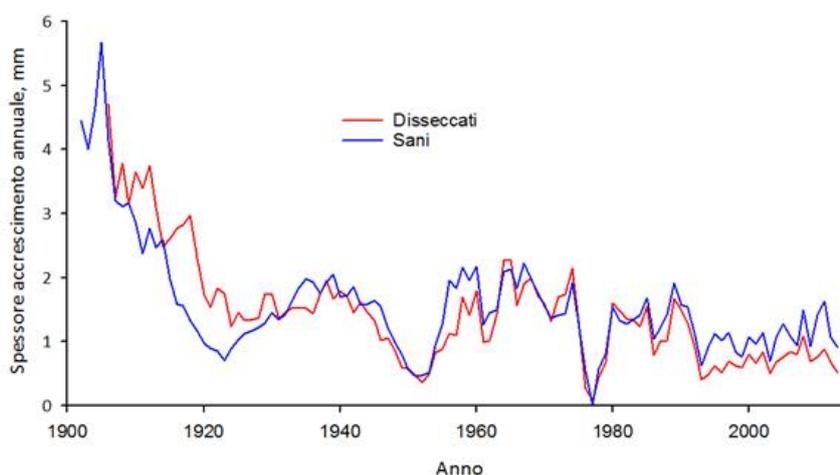
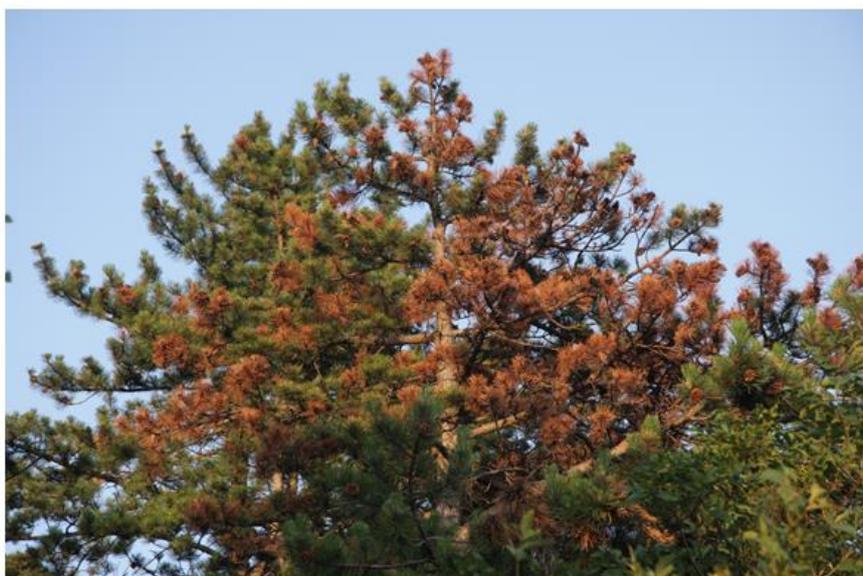
Va sottolineato che l'esteso disseccamento della chioma non comporta necessariamente la morte della pianta, ma certo determina una diminuzione di biomassa e l'indebolimento della pianta stessa. Questo spesso implica una futura maggiore vulnerabilità ad altri fattori di stress, compresi attacchi da parte di funghi, parassiti e altri agenti biotici (McDowell et al. 2011). Inoltre, episodi di stress intenso determinano danni al sistema di trasporto dell'acqua

che possono essere rilevati anche negli anni successivi, in fenomeno noto come ‘deterioramento idraulico’ che porta alla riduzione della produttività netta della pianta e quindi dell’ecosistema (Nardini et al. 2014).

fig. 3.9.2 – Relazioni tra percentuale di individui che mostravano disseccamento della chioma e vulnerabilità specie-specifica all’embolia xilematica (a) ovvero peso specifico del legno nelle diverse specie (b). *Qp: Quercus pubescens – Ac: Acer campestre – Fo: Fraxinus ornus – Am: Acer monspessulanum – Pm: Prunus mahaleb – Ps: Prunus spinosa.* Modificato da Nardini et al. (2013).

Uno studio successivo si è focalizzato sulle specie *O. carpinifolia*, *Q. pubescens* e *P. mahaleb* (Nardini et al. 2016). Attraverso misure della composizione isotopica dell’acqua nei condotti xilematici delle piante, confrontata con quella di acqua prelevata da suoli profondi nelle cavità carsiche ovvero di acqua piovana caduta nel corso della stagione, è stato possibile dimostrare come la vulnerabilità delle diverse specie ad eventi di aridità prolungata sia funzione non solo della vulnerabilità all’embolia xilematica (vedi sopra), ma anche della profondità degli apparati radicali. Infatti, apparati radicali più profondi permettono l’accesso a fonti di acqua più stabili e meno soggette ad esaurimento nel corso della stagione estiva. Dalle analisi condotte è emerso come *O. carpinifolia* (una delle specie che hanno subito maggiori impatti in termini di disseccamento, perdita di biomassa e mortalità) limiti l’assorbimento di acqua agli strati più superficiali. Al contrario, l’acqua utilizzata dalla specie che è apparsa in grado di superare anche le estati più aride senza danni evidenti (*P. mahaleb*) proviene al 70% da strati profondi sino a 13 metri, grazie ad apparati radicali sviluppati in profondità nelle cavità e fessurazioni del sottosuolo carsico.

L’aridità dell’estate 2012 e di alcune delle estati successive ha anche prodotto importanti impatti sulle popolazioni di *Pinus nigra* Arn. (Pino nero), specie introdotta nel Carso durante gli estesi interventi di rimboschimento condotti nella seconda metà del 1800, e oggi ampiamente naturalizzata (Poldini 1989). Un elevato numero di individui di questa specie ha mostrato evidenti segni di disseccamento della chioma e successiva morte (Fig. 3.9.3). Molto interessante è l’osservazione che altri individui, spesso molto vicini a quelli in deperimento, sono stati in grado di superare le anomalie climatiche delle recenti stagioni estive. Un’indagine dendrocronologica e fisiologica condotta nell’area di Bosco Bazzoni (Basovizza, Trieste) ha rivelato interessanti differenze tra questi due gruppi di individui (Petrucco et al. 2017). La Fig. 3.9.3 riporta l’andamento degli accrescimenti medi del legno in individui di Pino nero che a Febbraio 2014 apparivano disseccati (chiome disidratate e ingiallite) ovvero ancora perfettamente sani

(chiome verdi e folte). E' possibile notare come questi due gruppi mostrassero sostanziali differenze nell'andamento dell'accrescimento sin dal loro impianto, risalente a più di 100 anni fa. In particolare, gli individui che nell'ultimo decennio hanno maggiormente sofferto gli episodi di aridità estiva sono quelli che in età giovanile (1900-1930) mostravano i maggiori accrescimenti (Fig. 3.9.3). Al contrario, gli individui caratterizzati da minore accrescimento iniziale si sono dimostrati più resistenti allo stress idrico intenso dell'estate 2012 e successive. Dal grafico di Fig. 3.9.3 si nota come a partire dal 1995 gli individui oggi disseccati abbiano subito un progressivo decremento dell'accrescimento annuale a testimoniare che il disseccamento osservato a partire dall'estate 2012 è il risultato di fenomeni che hanno avuto inizio nel decennio precedente.

fig. 3.9.3 – Esemplari di Pinus nigra con chioma estesamente disseccata a seguito dell'aridità dell'estate 2012 (Foto: A. Nardini). Il grafico mostra l'andamento dell'accrescimento radiale del legno in alberi ancora sani o disseccati, campionati nell'area di Bosco Bazzoni nel Febbraio 2014. Modificato da Petrucco et al. (2017)

Analisi di composizione isotopica ($\delta^{13}C$ e $\delta^{18}O$) della cellulosa estratta dagli anelli di accrescimento hanno mostrato come il maggiore accrescimento iniziale degli individui oggi deperiti derivi probabilmente da una maggiore traspirazione accoppiata a una maggiore attività fotosintetica, strategia che comporta un elevato rischio di disseccamento in caso di aridità anomala. Al contrario, negli individui oggi ancora sani appare evidente un maggiore controllo della perdita di acqua, accoppiato a minore attività fotosintetica e minore accrescimento, ma anche a un ridotto rischio di disseccamento in caso di stress idrico intenso. Sono in corso ulteriori studi volti a chiarire se la differenza tra i due gruppi di individui abbia basi genetiche ovvero dipenda da condizioni microclimatiche, come ad esempio un accesso a diverse riserve di acqua da parte degli apparati radicali nei due gruppi di piante, o ancora da diversi livelli di competizione con altre piante per le risorse idriche del suolo.

Considerazioni conclusive e impatti futuri

Le condizioni di aridità marcata che hanno caratterizzato alcune delle estati dello scorso decennio hanno prodotto impatti sulla vegetazione dell'area carsica e in particolare su alcune specie legnose che hanno sofferto estesi disseccamenti precoci della chioma e in vari casi anche una aumentata probabilità di mortalità. Le evidenze disponibili suggeriscono che l'impatto di tali episodi climatici sia diverso per le diverse specie. La conoscenza della vulnerabilità specie-specifica all'embolia xilematica, accoppiata alla conoscenza della profondità degli apparati radicali e delle strategie di utilizzo dell'acqua, può fornire utili strumenti per prevedere quali specie siano maggiormente a rischio in caso di ripetersi di episodi di aridità pronunciata in futuro. E' possibile prevedere che in uno scenario di aumentata frequenza e intensità di periodi siccitosi, le specie più vulnerabili verranno penalizzate, a vantaggio di specie maggiormente resistenti all'embolia xilematica. Questo potrebbe comportare variazioni anche relativamente rapide della copertura e composizione vegetazionale (Kelly & Goulden 2008). Allo stesso tempo, la conoscenza dei fattori fisiologici che permettono agli alberi di resistere a stress idrico prolungato offre utili strumenti di selezione di specie e genotipi maggiormente adatti a scenari climatici futuri, e quindi preferibili per la pianificazione di interventi di riforestazione in ambienti naturali o urbani.

3.10 Relazioni tra la crescita degli arbusti-nani e la diversità vegetale ad alta quota: evidenze degli effetti indiretti del riscaldamento climatico nella tundra alpina

Francesco Boscutti, Enrico Braidot, Marco Zancani, Valentino Casolo – Università di Udine

La biodiversità delle comunità vegetali d'alta quota diminuisce se aumenta la copertura degli arbusti nani come il mirtillo nero. Con l'aumento delle temperature che le proiezioni climatiche indicano anche per il FVG, è ragionevole aspettarsi che la presenza e la copertura degli arbusti nani si espanderà verso quote più elevate, a scapito dell'abbondanza e varietà di altre specie tipiche della tundra alpina.

Formazioni di mirtillo in espansione sulla prateria alpina (C.ra Plotta, Timau)

Sintesi

L'aumento della crescita degli arbusti nani e la loro espansione sono risposte generalizzate al riscaldamento globale in molti ecosistemi artici e alpini. L'aumento delle temperature e l'espansione degli arbusti potrebbe causare evidenti cambiamenti nella struttura delle comunità vegetali, influenzando sia la composizione specifica, sia la biodiversità. Al fine di migliorare la comprensione dei cambiamenti in corso nelle fitocenosi nella tundra alpina, abbiamo studiato le relazioni tra clima, crescita degli arbusti e diversità vegetale, usando la differenza di quota per simulare il cambiamento di temperatura (cioè le condizioni climatiche che avremo in futuro a quote più elevate saranno probabilmente simili a quelle che oggi riscontriamo a quote inferiori, dove le temperature sono più alte). In particolare, abbiamo analizzato la crescita del mirtillo nero (*Vaccinium myrtillus* L.) e delle comunità vegetali ad esso associate lungo un intervallo altitudinale di circa 600 metri (corrispondenti ad una escursione termica di circa 3,3 K) nelle Alpi Carniche. Sono state misurati: l'età del *ramet* (porzione clonale di una pianta); la larghezza degli anelli di crescita e la lunghezza del germoglio dell'anno in *V. myrtillus*; la copertura degli arbusti nani e la diversità vegetale nella fitocenosi. A quote maggiori, i *ramet* di mirtillo nero erano più giovani, con germogli più corti e anelli di crescita più sottili.

La lunghezza del germoglio è risultata positivamente correlata con la copertura degli arbusti; tuttavia, quest'ultima non mostrava nessuna relazione con la quota. Una maggior copertura ha comportato un effetto negativo sulla diversità specifica (alfa diversità) e sulla diversità delle comunità vegetali (beta diversità), senza che queste variabili fossero influenzate dalla quota. Questi risultati suggeriscono che i cambiamenti della biodiversità relativa alla componente vegetale siano dovuti in modo diretto alla copertura degli arbusti nani e solo indirettamente al riscaldamento del clima, rappresentato in questo studio dal cambiamento delle temperature lungo il gradiente altitudinale.

Metodologia

Sito di studio e comunità vegetale

Lo studio è stato condotto in due valli (Fleons e Collina) nelle Alpi Carniche, interessando le comunità alpine dominate da *Vaccinim myrtillus* e *Rhododendron ferrugineum* (*Rhododendro ferruginei-Vaccinion myrtillii*) (Biondi et al., 2014). L'area era pascolata fino a circa 10 anni fa, e nelle aree di saggio non sono stati osservati segni del pascolamento, anche se non si può escludere la presenza di animali selvatici di passaggio.

Disegno di campionamento

Il campionamento ha seguito uno schema annidato nei due siti di studio. Sono state individuate 20 aree di saggio di 25 m^2 (5 x 5 m) scelte seguendo un gradiente altitudinale con un dislivello di circa 600 m (da 1690 a 2220 m s.l.m nella Valle di Fleons e da 1560 a 2080 m s.l.m. in quella di Collina). Le aree di saggio sono state individuate utilizzando una carta della vegetazione e un modello digitale di quota (*digital elevation model* - DEM), applicati in ambiente GIS (ESRI - ArcGIS 10.0). Le aree di saggio sono state posizionate in modo casuale all'interno delle comunità di arbusti nani, utilizzando fasce di quota di circa 30 m. Le aree di saggio sono state scelte sulla base dei seguenti criteri: (i) copertura arbustiva > 30%; (ii) esposizione a sud-est (90°-180°); (iii) pendenza tra 20 e 30°. Nella

valle di Collina, tre aree di saggio non sono state considerate perché nella fascia altimetrica prevista non è stato possibile soddisfare i criteri sopra elencati. Il campionamento è stato effettuato nell'estate del 2014.

Parametri di crescita delle popolazioni di Vaccinim myrtillus

Dieci individui clonali (*ramet*) di *V. myrtillus* sono stati individuati per ogni area di saggio; di questi, sono stati raccolti i fusti sotterranei a circa 5 cm di profondità e misurato il germoglio annuale di maggiore dimensione. Tutti i fusti sotterranei raccolti sono stati trattati con alcool glicerinato e inclusi in paraffina. Sono state effettuate sezioni trasversali di 5 µm utilizzando un microtomo (Leica RM 2135). Le sezioni sono state asciugate a 60°C per 2 ore. Successivamente sono state immerse in Xilolo I (2 min), Xilolo II (2 min), etanolo (100% I, 100 % II, 95%, 80%, 50%; 1 min ciascuno) e acqua distillata (1 min). Le sezioni sono state colorate con blu di toluidina per evidenziare gli anelli annuali di crescita. Le immagini delle sezioni sono state osservate al microcopio 40x–200x (Leica DMLB – Leica Microsystems, Germany) e acquisite con fotocamera digitale (Leica ICC 50). Sono state analizzate 370 sezioni per le quali sono stati contati gli anelli di crescita e misurato il loro spessore utilizzando il *plug-in* ObjectJ di ImageJ (Schneider et al., 2012).

Comunità vegetale

È stata stimata la copertura percentuale, rispetto alla superficie dell'area di saggio, dello strato arbustivo e di ogni singola specie rilevata; le classi di copertura utilizzate avevano un intervallo del 5 %. Tassonomia e nomenclatura seguono Flora Alpina (Aeschimann et al., 2004).

Analisi statistiche

Gli effetti della (i) quota sui parametri di crescita di *V. myrtillus* (età dei *ramet*, spessore degli anelli, lunghezza dei getti annuali), (ii) della quota e dei parametri di crescita sulla copertura di arbusti nani, e della quota e copertura degli arbusti nani sulla diversità specifica (alfa-diversità) sono stati valutati con l'utilizzo di modelli lineari misti. In tutti modelli, la località (valle di campionamento) è stata inclusa come fattore *random*. Preliminarmente, per tutte le variabili, è stato incluso anche un termine quadratico per tener conto di possibili relazioni di tipo non lineare. Tutte le analisi sono state effettuate con il pacchetto "nlme" (Pinheiro et al., 2017) presente nel programma R (R Core Team, 2017). Le assunzioni dei modelli sono state verificate con grafici diagnostici sulla distribuzione dei residui.

Per capire meglio le relazioni sulle causalità ipotizzate, è stato costruito un modello basato su equazioni strutturali spezzate (Piecewise Structural Equation Models - piecewise SEM), che permette di analizzare in un quadro di relazioni causali tutti i modelli lineari misti analizzati (Lefcheck, 2016, 2015). La presenza di eventuali relazioni non considerate è stata valutata con il test di Shipley (Shipley, 2009). Il modello è stato ritenuto valido se il test chi-quadro di Fisher C mostrava un $p > 0,05$.

Infine, è stata valutata anche l'influenza della quota e della copertura degli arbusti nani sulla composizione specifica delle comunità, utilizzando un approccio di decadenza di similarità floristica (beta-diversità) in base alla differenze di quota e di copertura degli arbusti. La beta-diversità è stata valutata con l'indice di dissimilarità di Bray-Curtis (Bray and Curtis, 1957). L'analisi è stata effettuata con delle regressioni su matrici di distanza (Lichstein, 2007). Anche in questo caso un termine quadratico è stato incluso preliminarmente per ogni variabile per considerare possibili relazioni non lineari. La significatività delle relazioni è stata valutata con un test a permutazioni (n= 9999). L'analisi è stata effettuata con il pacchetto di R "ecodist" (Goslee et al., 2007).

Evidenze attuali

Tutte le caratteristiche di crescita della pianta hanno evidenziato una relazione significativa con la quota. Ad altitudini maggiori, i *ramet* di mirtillo hanno presentato sia un minor numero di anelli (piante più giovani) sia anelli più sottili, e lunghezza dei germogli minore (Fig. 3.10.1a-c). I *ramet* di *V. myrtillus* hanno mostrato un'età media di 13,4 ± 3,2 anni (max= 44 anelli, min= 4 anelli), con un rapporto di circa 1 anno ogni 100 metri di dislivello. In media gli anelli erano larghi 84,8 ± 19,8 μm (max= 783,7 μm, min= 12,0 μm), mentre i germogli avevano una lunghezza media di 14,5 ± 2,7 cm (max= 25,0 cm, 7,0 cm), evidenziando un tasso di diminuzione di 5 μm per lo spessore degli anelli e di 2 cm per la lunghezza del germoglio, ogni 100 metri di dislivello.

La copertura degli arbusti nani ha evidenziato una relazione statisticamente significativa con la lunghezza dei germogli di *V. myrtillus* (Fig. 3.10.1d), mentre l'effetto della quota e delle altre caratteristiche delle piante (i.e. età del *ramet* e larghezza dell'anello di crescita) sulla copertura degli arbusti non ha mostrato differenze significative.

La ricchezza specifica è risultata minore nelle aree di saggio con maggior copertura degli arbusti (Fig. 1e); al contrario, non è emersa nessuna relazione significativa con la quota. Il numero di specie osservate variava da 46 nei *plot* con copertura arbustiva minore, a 11 in quelli a copertura maggiore.

La beta-diversità (i.e. dissimilarità floristica) è risultata principalmente influenzata della differenza di copertura degli arbusti nani (Δ copertura arbusti nani; r^2= 0,28, p= 0,001), evidenziando una relazione positiva significativa (Fig. 3.10.1f). Al contrario, l'effetto della quota (Δ altitudinale) sulla beta-diversità è stata trascurabile (r^2= 0,02, p= 0,07).

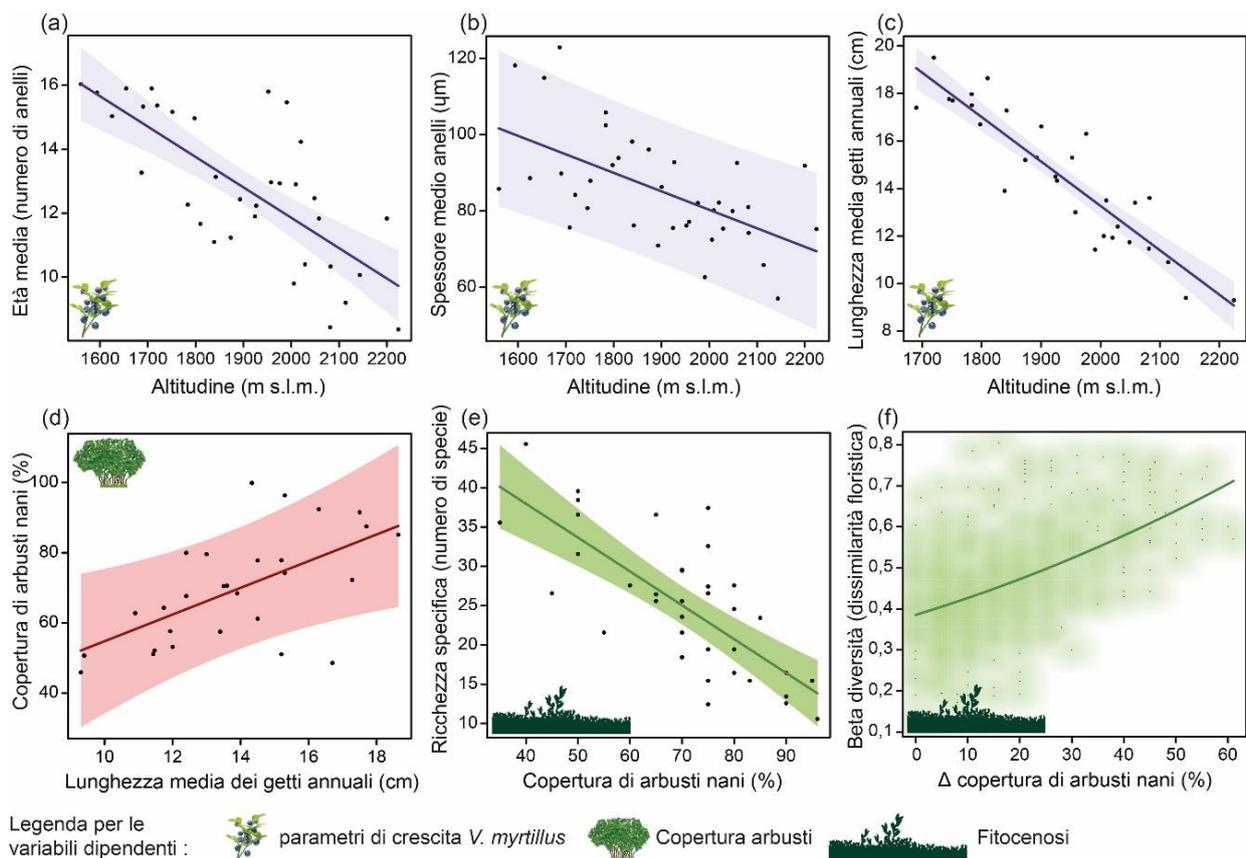
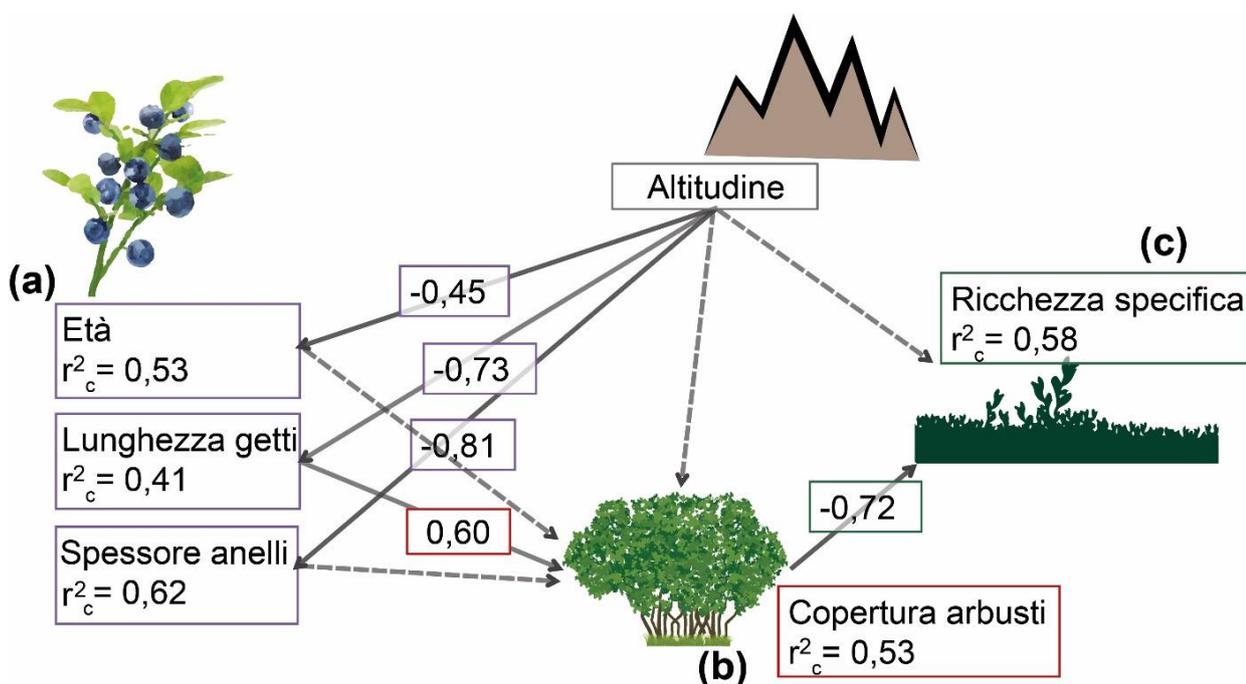
fig. 3.10.1 – Effetto della quota sulle caratteristiche di crescita di Vaccinium myrtillus (a-e) calcolate con modelli lineari misti: numero degli anelli (a), larghezza media degli anelli (b), lunghezza del germoglio (c); copertura degli arbusti di V. myrtillus (d); copertura degli arbusti nani sulla diversità alfa (e). Effetto della copertura degli arbusti nani sulla beta-diversità (f), calcolata attraverso regressioni su matrici di distanza. Le aree colorate indicano gli intervalli di confidenza (95 %).

I risultati del modello basato su equazioni strutturali spezzate hanno evidenziato i possibili rapporti causa-effetto tra le variabili studiate (Fisher's C statistic= 11,46, p= 0,49). Questo modello conferma che la quota influenza tutti i parametri di crescita misurati di *V. myrtillus*, ma non la copertura degli arbusti nani (Fig. 3.10.2a), che risulta, invece, influenzata dalla lunghezza del germoglio (Fig. 3.10.2b). La ricchezza specifica, infine, è significativamente correlata alla copertura degli arbusti nani e non alla quota (Fig. 3.10.2c).

fig. 3.10.2 – Diagramma del modello di equazioni strutturali spezzate , in cui si evidenziano le relazioni ipotizzate tra la quota (riquadro grigio) e le caratteristiche di crescita di Vaccinium myrtillus (a, riquadri violetto), copertura degli arbusti (b, riquadro rosso) e ricchezza specifica (c, riquadro grigio). Le line continue evidenziano relazioni significative ($p<0.05$), mentre quelle tratteggiate le relazioni testate risultate non significative. I coefficienti standardizzati delle variabili significative e il coefficiente di determinazione condizionato (r^2c) sono riportati nei riquadri.

Considerazioni conclusive e impatti futuri

Come ipotizzato, tutti i parametri di crescita di *V. myrtillus* tendono a diminuire all'aumentare della quota: le piante erano più giovani, con germogli più corti ed anelli di crescita più sottili a quote più elevate. Questi risultati confermano precedenti ricerche condotte sia su mirtillo (Fernández-Calvo and Obeso, 2004; Rixen et al., 2010; Woodward, 1986), sia su altre piante vascolari (Bär et al., 2008; Hallinger et al., 2010; Pyrke and Kirkpatrick, 1994; von Arx et al., 2006).

Uno spostamento verso latitudini maggiori di alcune specie di arbusti nani è stato già dimostrato utilizzando un approccio diacronico in ecosistemi artici (Felde et al., 2012; Klanderud and Birks, 2003; Wilson and Nilsson, 2009). L'età dello stolone clonale, misurata nel nostro studio, è rappresentativa dell'età della pianta e, di conseguenza, può essere indicativa di due diverse dinamiche in corso: (i) lo spostamento delle popolazioni di mirtillo da quote minori verso quelle superiori, oppure (ii) un incremento del ricambio (*turnover*) tra individui (e/o dei *ramet*) vecchi e giovani, dovuta agli stress causati dalle condizioni ambientali in alta quota. Entrambe le dinamiche suggerite sono in

accordo con la distribuzione delle età osservata e suggeriscono che sia in corso una potenziale colonizzazione delle quote superiori da parte di *V. myrtillus*.

Nel presente studio, il ruolo della crescita della specie chiave (*V. myrtillus*) si è dimostrato particolarmente rilevante a livello dell'intera comunità vegetale; è stato provato che l'effetto sulla biodiversità è dovuto all'aumento della copertura vegetale, piuttosto che dalla quota. Cambiamenti nello strato dominante della fitocenosi (ovvero quando poche specie contribuiscono per la porzione maggioritaria della copertura totale) possono diminuire l'eterogeneità di una comunità e, quindi, innescare il processo di estinzione per sostituzione di numerose specie (Walker et al., 2006). I cambiamenti in abbondanza e dimensioni degli arbusti possono condurre a considerevoli trasformazioni sia nella struttura, sia nella composizione delle comunità vegetali (Arft et al., 1999; Kumordzi et al., 2016; Walker et al., 2006). I risultati ottenuti provano che l'incespugliamento può causare un declino della biodiversità nella tundra alpina, come osservato in sistemi simili (Walker et al., 2006). Questo processo sembra indirettamente mediato dall'effetto della quota altimetrica sulla crescita delle specie chiave. Infatti, la crescita dei rami dell'anno di *V. myrtillus* aumenta la copertura dello strato arbustivo, che, a sua volta, diminuisce la diversità vegetale.

I risultati descritti dimostrano che per interpretare i cambiamenti degli ecosistemi sia necessario considerare una vasta gamma di variabili, da quelle relative alle specie dominanti (specie chiave), a quelle dell'intera comunità. Inoltre, suggeriscono che, al limite superiore degli alberi, i cambiamenti nella diversità vegetale, sono direttamente guidati dalla copertura degli arbusti nani e solo indirettamente dal riscaldamento del clima, rappresentato in questo studio dai cambiamenti delle temperature dovuto alla quota.

3.11 Energia: effetti del riscaldamento globale sui consumi energetici per il riscaldamento di civili abitazioni

Andrea Cicogna[1], Valentina Gallina[2], Dario Giaiotti[1, 3], Elena Gianesini[1], Fulvio Stel[1,2] e Michele Zuppichin[3]
[1]ARPA FVG
[2]ICTP
[3]Università degli Studi di Trieste

Assunto che la temperatura media del pianeta sta aumentando, viene naturale chiedersi se, in futuro, ci sarà un risparmio di risorse per il riscaldamento degli edifici, durante gli inverni, ma anche se i costi per il loro raffrescamento estivo aumenteranno. Qui si prova a dare una risposta a questa domanda, che indirettamente riguarda anche il tema dell'inquinamento ambientale.

In sintesi i punti principali del caso studio sono:

- *Scenari di riduzione dei consumi di metano per il riscaldamento domestico con il clima che cambia.*
- *Il cambiamento climatico in atto ci farà risparmiare sulla bolletta del gas; ma cosa dire dei costi per la climatizzazione estiva?*
- *Gli impatti del clima che cambia a scala regionale ci dicono che probabilmente ridurremo le risorse per riscaldare le nostre case d'inverno, ma sicuramente spenderemo di più per raffrescarle d'estate.*

Sintesi

I cambiamenti climatici in atto a livello globale hanno delle ripercussioni a livello locale. In particolare l'energia utilizzata per di riscaldamento delle civili abitazioni è collegata alle variazioni delle condizioni atmosferiche in cui gli edifici saranno immersi negli anni a venire.

A partire dagli scenari climatici per l'intero XXI secolo, generati tramite modelli atmosferici, sono stati valutati gli impatti sul consumo di metano per il riscaldamento di una civile abitazione nella pianura della regione Friuli Venezia Giulia.

Sulla base dei consumi attuali e della loro dipendenza dalle condizioni meteorologiche, sono stati simulati i consumi futuri.

I risultati mostrano che le variazioni si collocano entro un intervallo di possibilità, che dipendono dal tipo di scenario climatico futuro: RCP8.5, di sicuro e considerevole riscaldamento, e RCP2.6, di moderato innalzamento delle temperatura media del pianeta.

Il cambiamento climatico in atto ci farà risparmiare sulla bolletta del gas. Nel caso moderato RCP2.6 potremmo immaginare una riduzione del consumo energetico del 10%, a partire dal 2030. Invece nel caso RCP8.5, il risparmio sarà progressivo nel corso degli anni che seguiranno il 2030, sino al 50% di fine secolo.

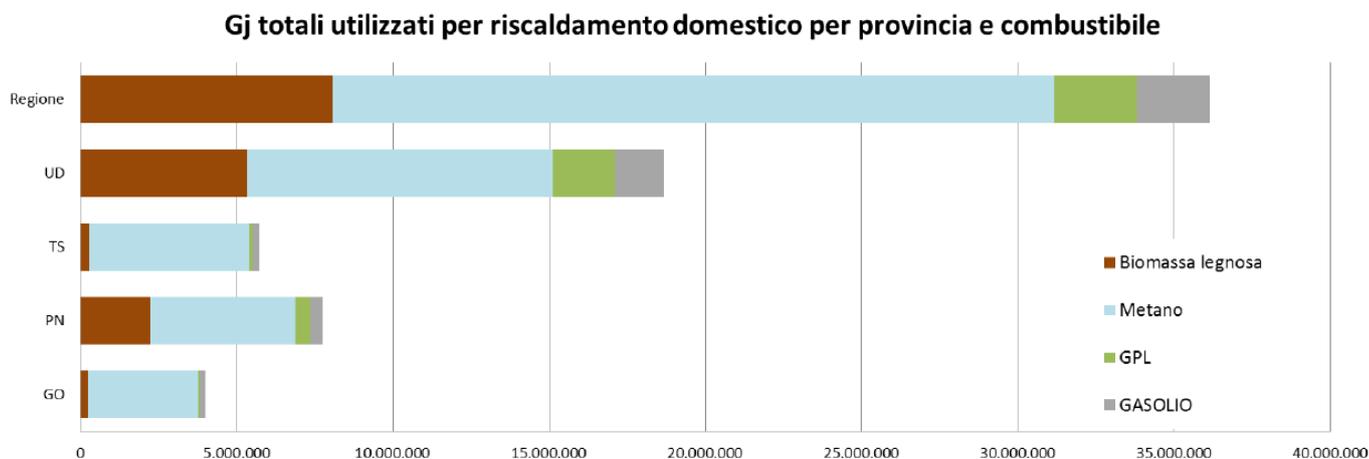
Un'analoga stima dei costi per la climatizzazione estiva, che assume la proporzionalità tra il consumo energetico estivo e l'aumento della temperatura dell'aria in cui saranno immerse la abitazioni, indica che dal 2030 al 2070 raddoppieremo i consumi, inoltre verso file secolo potrebbero essere perfino quattro volte le attuali.

Gli impatti del clima che cambia a scala regionale ci dicono che probabilmente ridurremo le risorse per riscaldare le nostre case d'inverno, ma sicuramente spenderemo di più per raffrescarle d'estate.

Evidenze attuali

La legge fisica che descrive il trasferimento del calore in un mezzo, in cui sono presenti differenze di temperatura, è nota; si tratta delle legge di Fourier. Tale legge stabilisce che sono le differenze di temperatura a determinare il flusso energetico. Per gli edifici, i quali sono immersi nell'atmosfera terrestre, cioè in un ambiente avente una sua temperatura propria, il mantenimento di una temperatura interna, diversa da quella esterna, richiede l'impiego di energia. Praticamente, d'inverno è necessario mantenere riscaldati gli interni perché il calore fluisce verso l'atmosfera esterna, mentre durante l'estate è necessario raffrescarli perché il flusso è invertito, essendo l'atmosfera più calda degli interni.

Considerando il riscaldamento domestico nella regione Friuli Venezia Giulia, si riscontra essenzialmente l'uso di quattro tipi di combustibili: metano, gasolio, olio combustibile e biomassa legnosa. Vedi fig. 3.11.1.

fig. 3.11.1 – Energia annua utilizzata per il riscaldamento delle abitazioni, ripartita per provincia e tipo di combustibile impiegato. I valori sono espressi in GJ e si riferiscono ai consumi aggiornati al 2010. (ARPA-FVG, 2013)

Tenuto conto che il metano è il vettore energetico più diffuso, fig. 3.11.1, ed inoltre che i consumi giornalieri sono monitorabili con maggior precisione rispetto agli altri combustibili, si è determinata la correlazione tra il consumo di metano per riscaldamento e le condizioni termiche dell'atmosfera.

Prendendo come caso studio i consumi mensili di una abitazione situata nella media pianura Friulana, il cui cumulato annuo è congruente con quello medio famigliare, derivante dall'inventario regionale delle emissioni in atmosfera (ARPA-FVG, 2013), vedi tab. 3.11.1, sono state calcolate le correlazioni tra i consumi mensili e l'eccedenza di temperatura dell'aria rispetto ad alcune soglie appositamente fissate.

tab. 3.11.1 – Consumi di metano in regione, espressi in m3/anno, numero di nuclei famigliari per provincia e numero di nuclei famigliari che lo utilizzano per uso domestico. Infine sono presentati il consumo medio annuo famigliare, espresso in m3/(anno famiglia) e l'energia corrispondente in GJ. Fonte (ARPA-FVG, 2013).

Provincia	Metri cubi metano	Numero famiglie	Numero famiglie utilizzatrici	metri cubi per famiglia	GJ per famiglia
GO		65.966	64.429		55
PN		132.307	101.948		45
TS		121.352	106.247		48
UD		243.062	170.635		57
Totale complessivo	**651.736.297**	**562.687**	**438.018**	**1.488**	**52**

Nel dettaglio, sono state definite delle grandezze, chiamate gradi giorno (HDD), che sono la sommatoria giornaliera della differenza tra una soglia di temperatura fissata e quella dell'aria. Il valore, se positivo viene sommato, invece se è negativo viene trascurato. In questo modo si considerano le differenze di temperatura rispetto alla soglia solo nel caso in cui l'aria viene considerata fredda. Ricordando il concetto fisico alla base della legge di Fourier, i gradi giorno sono proporzionalmente legati all'energia spesa per mantenere un ambiente alla temperatura della soglia, mentre l'atmosfera che lo circonda è più fredda. Inoltre l'energia è proporzionale ai metri cubi di metano impiegato per il riscaldamento; quindi i consumi di metano sono funzione dei gradi giorno.

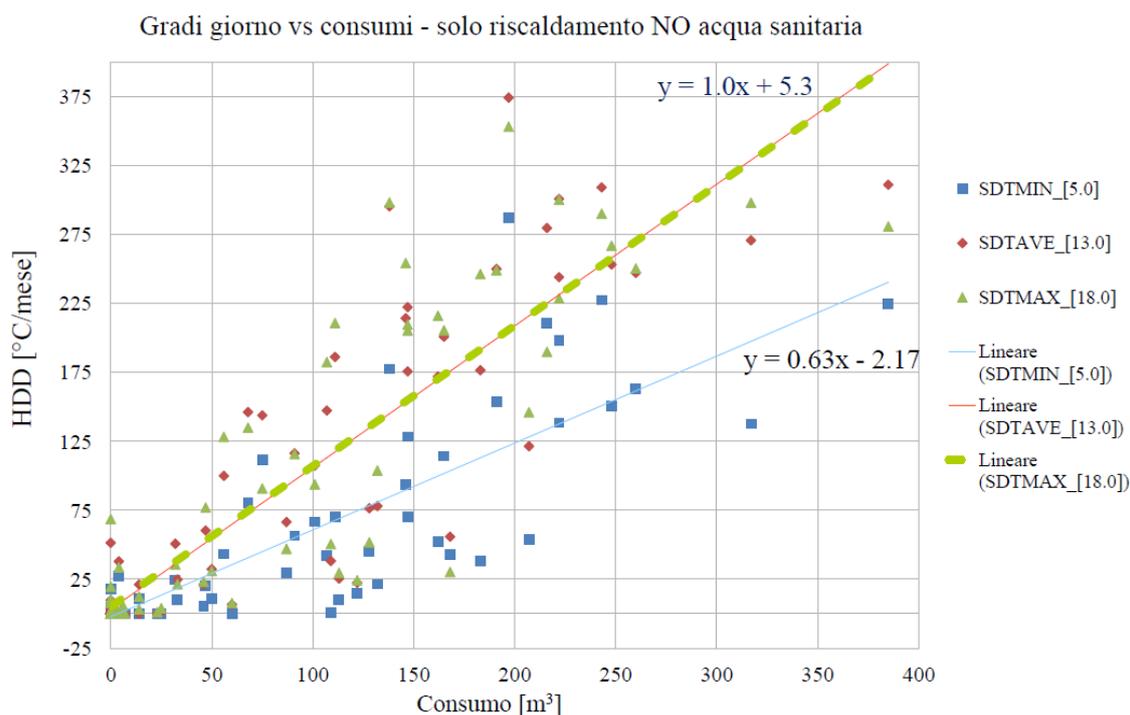
Ci sono alcuni accorgimenti a cui prestare attenzione nella definizione dei gradi giorno, i quali debbono rispecchiare il reale consumo energetico per riscaldamento. Innanzitutto gli edifici sono dotati di capacità termica, quindi la scelta di una soglia triviale, come quella corrispondente alla temperatura ideale interna nelle abitazioni, per esempio i 18°C, induce a conteggiare gradi giorni anche in periodi dell'anno in cui gli ambienti non sono riscaldati. Infatti, all'inizio dell'autunno, nonostante la temperatura dell'aria scenda sotto la temperatura ideale, le famiglie non sentono l'esigenza di riscaldare le abitazioni. Inoltre tra i consumi famigliari di metano sono da considerare anche quelli per il riscaldamento dell'acqua sanitaria, ovvero l'acqua utilizzata per lavare e lavarsi, e la preparazione degli alimenti. Questi consumi ci sono anche nei mesi estivi e generalmente possono considerarsi mensilmente costanti.

Per questo lavoro sono stati analizzati i consumi di metano mensili da giugno 2011 a luglio 2017. Eseguendo una media dei consumi nei mesi estivi, durante i quali l'impiego del metano è imputabile al riscaldamento della sola acqua sanitaria, è stato possibile scorporare tale contributo dai consumi complessivi di ciascun mese, con un buon livello di approssimazione. Infatti anche l'energia necessaria per scaldare l'acqua sanitaria è funzione della differenza tra la temperatura dell'acqua fornita dalla rete idrica e la temperatura ideale che si vuole far raggiungere all'acqua calda. Visto che la temperatura della rete idrica varia nel corso dell'anno, il consumo energetico è certamente diverso in agosto, piuttosto che in giugno, che sono entrambe considerati mesi caldi, nella nostra regione. Ad ogni modo tali variazioni sono piccole rispetto ai consumi per riscaldamento, quindi l'adozione di un valore costante durante tutto l'anno per l'impiego in acqua sanitaria è giustificato, anche alla luce delle contenute variazioni di consumo idrico pro capite per scopi sanitari, durante l'intero anno.

Venendo alle soglie utilizzate per i gradi giorno, ne sono state adottate tre, ciascuna delle quali applicata ad un valore di temperatura giornaliera. In particolare, per la temperatura media è stata fissata la soglia a 13°C, per la temperatura minima giornaliera, la soglia di 5 °C, infine per la temperatura massima giornaliera, la soglia di 18 °C. Queste tre scelte sono state fatte a seguito di considerazioni soggettive sulla percezione di freddo nelle abitazioni rispetto alle condizioni meteorologiche esterne.

La fig. 3.11.2 mostra la correlazione esistente tra i consumi mensili di metano e la sommatoria mensile di gradi giorno, per ciascuna temperatura giornaliera e corrispondente soglia. Si noti che esiste una relazione lineare tra consumi e gradi giorno, inoltre che i parametri della retta di regressione sono gli stessi nel caso si utilizzino la temperatura media oppure quella massima. Mentre il consumo è maggiore, a parità di gradi giorno, se si considera la temperatura minima. Questo fatto è interpretabile con una scelta della soglia troppo bassa, ovvero le famiglie usano il riscaldamento in giornate con temperature minime mediamente superiori ai 5 °C.

Pertanto si è deciso di considerare rappresentativa della realtà dei consumi la relazione lineare rispetto i gradi giorno calcolati usando la temperatura media giornaliera con la soglia fissata a 13 °C. Tale relazione ha anche il livello di confidenza maggiore e concorda con l'esperienza, la quale indica che le abitazioni sono riscaldate quando mediamente l'ambiente che le circonda è percepito come freddo.

fig. 3.11.2 –Diagramma a dispersione della sommatoria mensile di gradi giorno (HDD) e dei consumi mensili di metano (Consumo) relativi al solo riscaldamento dell'abitazione. Le misure sono state acquisite nel periodo che va da giugno 2011 a luglio 2017. I punti della classe SDTMIN_[5.0], quadrati di colore blu, si riferiscono ai gradi giorno calcolati utilizzando la temperatura minima giornaliera e la soglia a 5.0 °C. I punti della classe SDTAVE_[13.0], rombi di colore rosso, si riferiscono ai gradi giorno calcolati utilizzando la temperatura media giornaliera e la soglia a 13.0 °C. I punti della classe SDTMAX_[18.0], triangoli di colore verde, si riferiscono ai gradi giorno calcolati utilizzando la temperatura massima giornaliera e la soglia a 18.0 °C. Sul grafico sono inoltre riportate le rette di regressione di tutti e tre gli insiemi di dati, con i corrispondenti valori di pendenza ed intercetta. Le incertezze sono di un'unità sull'ultima cifra decimale e la correlazione è statisticamente significativa. Per gli insiemi SDTAVE_[13.0] e SDTMAX_[18.0] le rette sono indistinguibili, tenuto conto delle incertezze dei valori forniti dalla regressione su ciascun parametro della retta.

Metodologia

Appurata l'esistenza della correlazione lineare tra consumi mensili di gas metano e i gradi giorno (SDTAVE_[13.0]), è possibile fare delle proiezioni sui consumi annuali di metano per riscaldamento, tenendo conto degli effetti dei cambiamenti climatici su scala regionale.

Sono state considerate le serie temporali di temperatura media giornaliera sulla media pianura friulana, per il periodo 2006-2100, di ciascuno dei cinque modelli, i quali sono stati scelti per gli scopi della stesura di questo rapporto, estraendoli dal database EURO-CORDEX. (Benestad, 2017) (EU-CORDEX, 2017).

Per i criteri usati nella scelta dei modelli, si rimanda alla specifica sezione di questo rapporto. Inoltre, sono stati individuati due gruppi di serie, ciascuno di cinque simulazioni: uno riguardante l'ipotesi di riscaldamento globale più moderato, indicato con la sigla RCP2.6; l'altro associato allo scenario di riscaldamento peggiore, cioè il RCP8.5.

Le temperature medie giornaliere sono state corrette rimuovendo sistematicamente la media mensile delle differenze tra le temperature simulate e quelle misurate, sulla media pianura friulana, nel periodo 1991-2005.

Successivamente per ciascuna serie temporale sono stati calcolati i gradi giorno definendo la soglia a 13 °C (SDTAVE_[13.0]). I gradi giorno mensili sono stati sommati annualmente, fornendo una grandezza proporzionalmente legata al consumo annuo di metano per il riscaldamento domestico, secondo la relazione presentata in fig. 3.11.2.

Utilizzando le simulazioni dei gradi giorno annuali del periodo su cui si è stata determinata la regressione lineare tra consumi e gradi giorno misurati, cioè gli inverni dal 2011 al 2016, sono stati calcolati gli scostamenti relativi, rispetto a quel periodo di riferimento, per ciascun anno della serie temporale, fino al 2100. In pratica sono state determinate le variazioni di consumo di metano, rispetto a quanto consumato mediamente in un anno, da una famiglia media, nel periodo attuale. Tali variazioni sono state espresse percentualmente e sono presentate nella fig. 3.11.3.

Per rendere robusta la valutazione rispetto alle incertezze introdotte da ciascun modello climatico impiegato, è stata calcolata la media di ensemble nell'insieme di 5 simulazioni modellistiche afferenti allo scenario climatico.

L'andamento delle medie descrive le variazioni di consumo annuale di metano per riscaldamento per ciascuno dei prossimi anni fino a fine secolo per i due scenari di cambiamento climatico RCP2.6 e RCP 8.5.

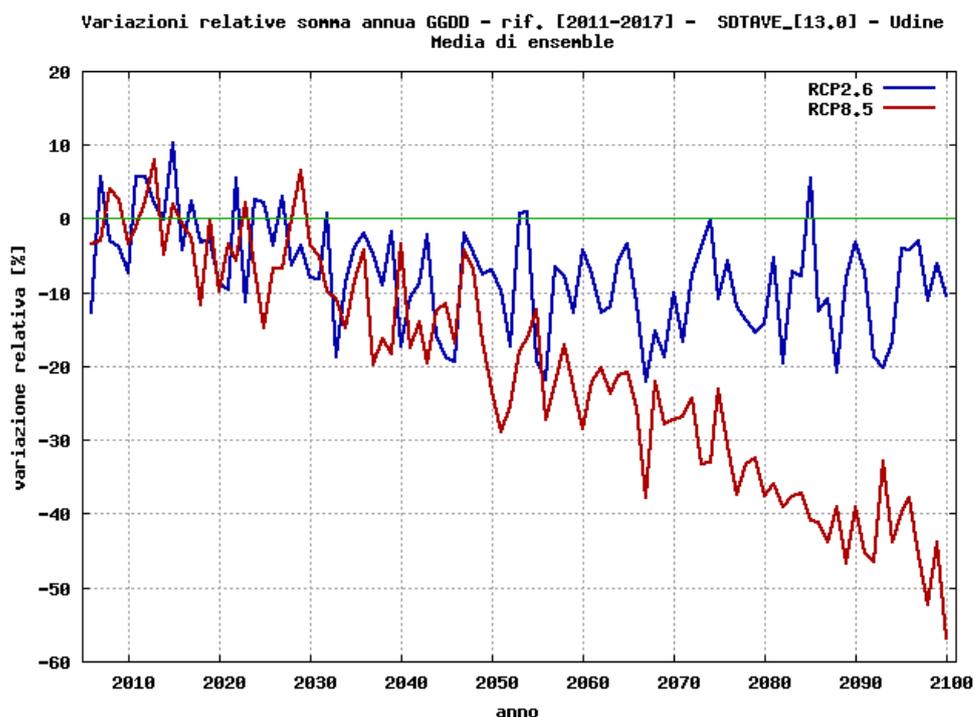
Impatti futuri

Gli scenari futuri di consumo annuo di metano per riscaldamento domestico sono presentati nella fig. 3.11.3.

Per entrambi gli scenari di cambiamento climatico, le variazioni del consumo sono previste calare moderatamente fino a metà del XXI secolo. Nella prima parte, sino al 2050, i due scenari non sono distinguibili e la riduzione dei consumi si assesta attorno al 10% in meno rispetto a quelli attuali. Invece, nella seconda parte del secolo, le serie divergono. In particolare, nello scenario RCP2.6 la riduzione dei consumi si mantiene costante sul 10%, mentre nello scenario RCP8.5 la riduzione è progressiva, raggiungendo il valore estremo di 50%. alla fine del secolo.

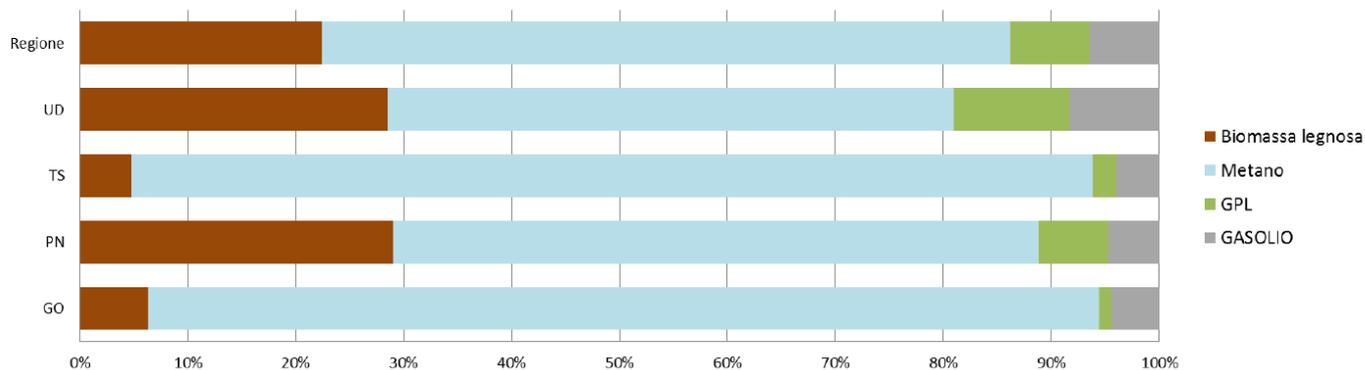
Questi due risultati stabiliscono una forchetta entro la quale è probabile si collochi l'evoluzione dei consumi più verosimile. Pertanto viene naturale concludere che se, in futuro, le famiglie della nostra regione non cambieranno significativamente le abitudini di riscaldamento delle proprie abitazioni, per quanto riguarda il gas metano, dovremmo assistere ad una riduzione dei consumi del 10% rispetto agli attuali, sino al 2050, mentre successivamente sarà possibile un'ulteriore riduzione.

Dalla fig. 3.11.3 si nota inoltre che le fluttuazioni interannuali saranno leggermente più amplificate, rispetto a quelle che riscontriamo in questo periodo, per lo scenario RCP2.6, mentre lo saranno di meno in caso di scenario RCP8.5.

fig. 3.11.3 –Serie temporale delle variazioni relative della somma annuale dei gradi giorno (SDTAVE_[13.0]), rispetto alla media del periodo 2011-2017, per ciascuno dei due scenari di cambiamento climatico futuro: RCP2.6, linea blue, e RCP8.5, linea rossa. Ognuna delle due serie è la media di ensemble dell'insieme delle cinque simulazioni EU-CORDEX scelte per gli studi condotti nell'ambito di questo rapporto. Le variazioni sono espresse in percentuale. Queste variazioni sono correlate con le variazioni di consumi di metano, secondo le relazioni evidenziato in fig. 3.11.2.

Alla luce di questi risultati, viene da chiedersi se la riduzione dei consumi di metano possa essere utilizzata per dedurre diminuzioni simili nell'utilizzo degli altri vettori energetici, che sono attualmente impiegati per il riscaldamento domestico.

Considerando le informazioni disponibili nell'inventario regionale delle emissioni in atmosfera (ARPA-FVG, 2013), l'attuale ripartizione dei consumi energetici è quella descritta dalla fig. 3.11.4. Quindi esiste l'informazione sulla proporzionalità dei consumi.

Ad ogni modo l'estensione lineare dei risultati ottenuti per il metano agli altri vettori energetici è un approccio troppo semplice che rischia di produrre impatti non realistici. Infatti mentre la correlazione tra gradi giorno e consumi mensili è stata verificata esistere ed essere robusta su base mensile, per quanto concerne il consumo della biomassa legnosa, per esempio, ci sono parecchie incertezze, anche indotte da elementi comportamentali, che sono difficilmente valutabili. (PMRQA, 2010) (PAR 2011). A questo proposito, va sottolineato che in questo studio non si tengono in considerazione fattori che orientano gli utilizzatori verso un vettore energetico piuttosto che un altro, indipendentemente dai determinati meteorologici; si pensi al costo del combustibile e alla facilità di approvvigionamento. Se si ipotizza un aumento mondiale della domanda di gas naturale (WEO, 2017), è probabile che il costo del gas metano aumenti, quindi ci possa essere un maggior consumo di biomassa legnosa, visto che quest'ultima è di facile reperimento e gestione logistica a livello famigliare, nel contesto della nostra regione

fig. 3.11.4 –Ripartizione percentuale dell'energia veicolata dai diversi vettori per il riscaldamento domestico in regione e per ciascuna area provinciale. I valori si riferiscono ai consumi aggiornati al 2010. (ARPA-FVG, 2013)

Avere una proiezione sui consumi futuri dei combustibili per riscaldamento, porta a dedurre anche il collegato trend nell'emissione degli inquinanti in atmosfera, che sono generati durante la produzione del calore. Infatti la massa dell'inquinante prodotto durante la combustione è funzione della massa del combusto, di quella del comburente disponibile e del modo in cui avviene la combustione. Nel caso del metano, la percentuale di riduzione del consumo diventa anche la percentuale di anidride carbonica che viene prodotta in meno durante al combustione.

Per altri tipi di inquinanti, come le polveri sottili, oppure molecole complesse generate in fase di combustione, parallelismi tra riduzione di energia impiegata per il riscaldamento e produzione di inquinanti sono più ardui. In questi casi le proiezioni necessitano un approfondimento specifico in cui i gradi giorno sono solo uno degli elementi da prendere in considerazione e, per alcuni vettori, neppure l'essenziale.

Analogamente a quanto detto per il riscaldamento dei locali d'inverno, l'approccio qui adottato può essere la base per la valutazione dell'energia impiegata per il raffrescamento degli edifici nei mesi caldi. Certamente l'uso dei condizionatori è funzione della percezione di eccessivo calore nei locali, il quale è sicuramente legato alla differenza di temperatura tra l'ambiente e quella considerata ottimale. Ovviamente non si deve trascurare il ruolo del vapore acqueo nella percezione del calore.

Comunque, l'idea che aumentando la temperatura media dell'aria ci porti a fare maggior uso dei climatizzatori ambientali è fondata. Per tale motivo è stato eseguito il calcolo della variazione dei gradi giorno rispetto a delle soglie di temperatura che si assume possano indicare l'uso di energia per il raffrescamento degli edifici.

Mutuando l'approccio dei gradi giorno per il riscaldamento, sono state definite delle grandezze, chiamate anche in questo caso gradi giorno (CDD), che sono la sommatoria giornaliera della differenza tra la temperatura dell'aria ed una soglia fissata. Il valore, se positivo viene sommato, invece se è negativo viene trascurato. In questo modo si considerano le differenze di temperatura rispetto alla soglia solo nel caso in cui l'aria viene considerata calda.

Venendo alle soglie utilizzate, ne sono state adottate tre, ciascuna delle quali applicata ad un valore di temperatura giornaliera. In particolare, per la temperatura media è stata fissata la soglia a 24 °C, per la temperatura minima giornaliera, la soglia di 20 °C, infine per la temperatura massima giornaliera, la soglia di 30 °C. Queste tre scelte sono state fatte a seguito di considerazioni soggettive sulla percezione di caldo nelle abitazioni rispetto alle condizioni meteorologiche esterne.

Per questo tipo di consumi, che sono imputabili all'uso di energia elettrica, non è stato possibile costruire una relazione tra energia consumata, per il solo raffrescamento dei locali, e i gradi giorno. Infatti è molto difficile scorporare dai consumi di energia elettrica famigliare, tutti quelli afferenti all'uso di tale forma di energia per scopi diversi da quelli di climatizzazione dei locali. Si pensi infatti a tutti gli elettrodomestici, l'illuminazione e ai dispositivi elettromeccanici di cui sono dotate le abitazioni (Mazzolini, 2017).

Quindi, solo con l'intento di arricchire il presente lavoro con delle informazioni complementari allo studio sul riscaldamento, sono presentate le variazioni percentuali, della somma annuale dei gradi giorno definiti per descrivere l'esigenza di raffrescamento delle abitazioni. I risultati per i tre tipi di gradi giorni sono presentati nelle fig. 3.11.5, 3.11.6 e 3.11.7.

fig. 3.11.5 - Serie temporale delle variazioni relative della somma annuale dei gradi giorno (SDTMIN_[20.0]), rispetto alla media del periodo 2011-2017, per ciascuno dei due scenari di cambiamento climatico futuro: RCP2.6, linea blue, e RCP8.5, linea rossa. Ognuna delle due serie è la media di ensemble dell'insieme delle cinque simulazioni EU-CORDEX scelte per gli studi condotti nell'ambito di questo rapporto. Le variazioni sono espresse in percentuale. In questo caso i gradi giorno (CDD) sono stati calcolati utilizzando la temperatura minima giornaliera e la soglia a 20.0 °C.

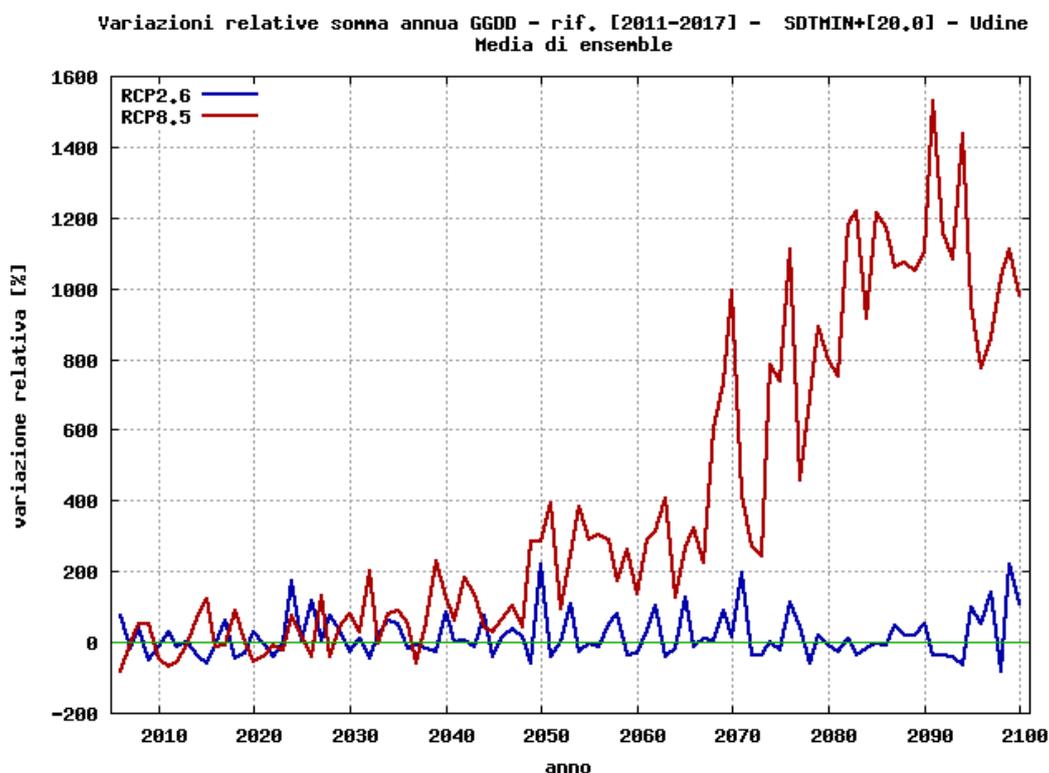



fig. 3.11.6 - Serie temporale delle variazioni relative della somma annuale dei gradi giorno (SDTAVE_[24.0]), rispetto alla media del periodo 2011-2017, per ciascuno dei due scenari di cambiamento climatico futuro: RCP2.6, linea blue, e RCP8.5, linea rossa. Ognuna delle due serie è la media di ensemble dell'insieme delle cinque simulazioni EU-CORDEX scelte per gli studi condotti nell'ambito di questo rapporto. Le variazioni sono espresse in percentuale. In questo caso i gradi giorno (CDD) sono stati calcolati utilizzando la temperatura media giornaliera e la soglia a 24.0 °C.

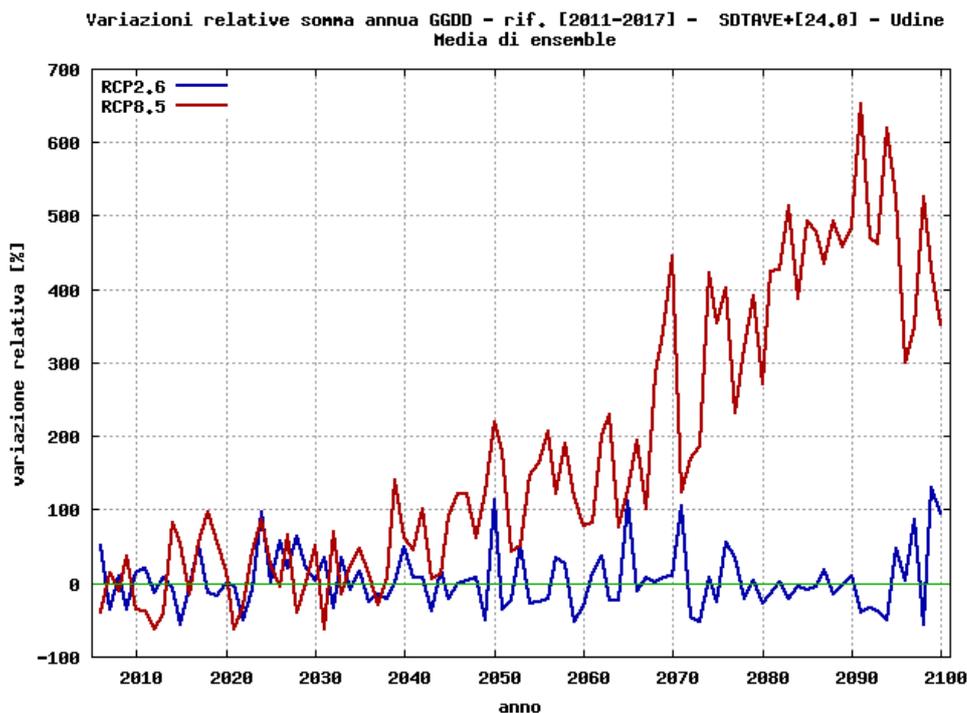
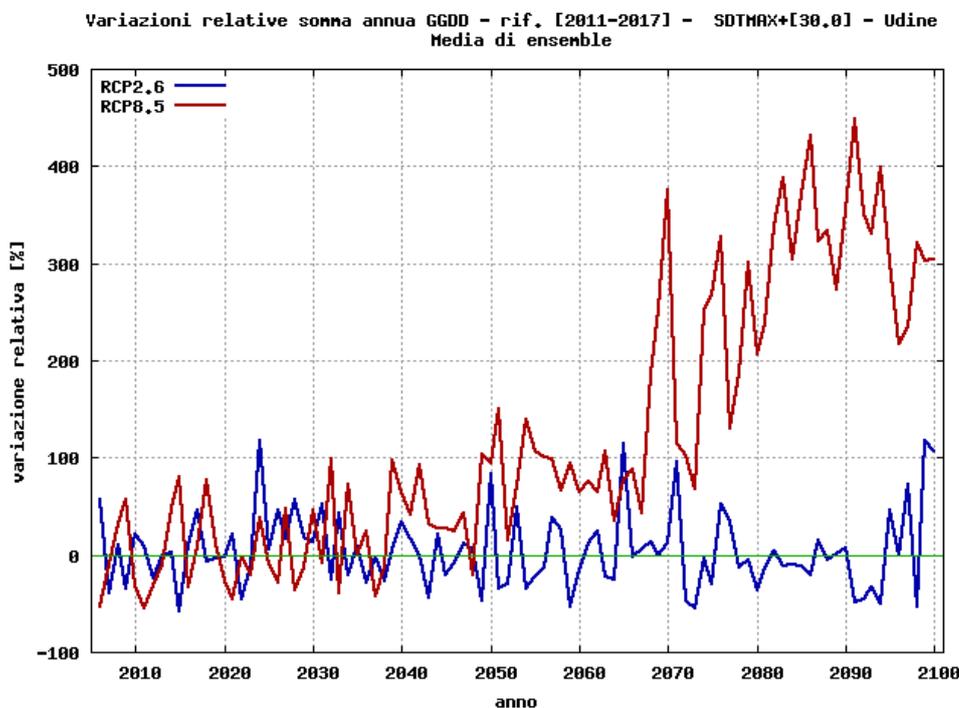



fig. 3.11.7 - Serie temporale delle variazioni relative della somma annuale dei gradi giorno (SDTMAX_[30.0]), rispetto alla media del periodo 2011-2017, per ciascuno dei due scenari di cambiamento climatico futuro: RCP2.6, linea blue, e RCP8.5, linea rossa. Ognuna delle due serie è la media di ensemble dell'insieme delle cinque simulazioni EU-CORDEX scelte per gli studi condotti nell'ambito di questo rapporto. Le variazioni sono espresse in percentuale. In questo caso i gradi giorno (CDD) sono stati calcolati utilizzando la temperatura massima giornaliera e la soglia a 30.0 °C.

Analizzando le proiezioni delle variazioni delle sommatorie dei gradi giorno calcolati tramite temperatura giornaliera minima, fig. 3.11.5, temperatura media, fig. 3.11.6, e temperatura massima, fig. 3.11.7, si nota che nel caso dello scenario RCP2.6 non ci saranno sostanziali cambiamenti rispetto alle esigenze attuali di raffrescamento dei locali. Invece nel caso dello scenario RCP8.5, l'esigenza aumenterà a partire dal 2040, con un'impennata verso la fine del secolo.

Se consideriamo possibile un'evoluzione compresa tra la proiezione mostrata dallo scenario RCP2.6 e quella RCP8.5, tra il 2030 ed il 2070 è possibile che ci sia anche un raddoppio della necessità di raffrescamento. Nell'ultimo quarto di secolo, invece, le esigenze saranno decisamente maggiori. Si noti inoltre che, per lo scenario RCP8.5, i tre indicatori hanno scale di risposta diverse, pur preservando la forma degli andamenti nel tempo. In parte questo fatto dipende dalla scelta della soglia, ad ogni modo il grafico della fig. 3.11.5 ci dice che lo scenario RCP8.5 prevede importanti aumenti delle temperature minime giornaliere, nei mesi caldi, rispetto alle attuali. Spingerci oltre a queste considerazioni è altamente speculativo e fuori dagli scopi di questo lavoro. Saranno necessari approfondimenti maggiori per simulare adeguatamente le richieste energetiche destinate al condizionamento dei locali, durante i periodi estivi durante i prossimi decenni.

Considerazioni conclusive

L'analisi dei dati e delle simulazioni presentata in questo articolo mostra come si possa pervenire ad una valutazione degli impatti sui consumi energetici, per il riscaldamento domestico, tramite semplici modelli basati prevalentemente sulle variabili climatiche primarie. Certamente, l'approccio che è stato considerato, applicando i gradi giorno, esplora piuttosto bene le proiezioni sui consumi di gas metano ad uso famigliare, mentre per altri vettori energetici sono sicuramente necessarie investigazioni più raffinate.

Partendo dagli scenari sull'utilizzo dell'energia per il riscaldamento, è possibile anche affrontare il tema delle variazioni delle emissioni di inquinati in atmosfera. Anche in questo caso approfondimenti più o meno sofisticati sono necessari in funzione dell'inquinante.

Infine esistono fonti d'incertezza importanti, che limitano fortemente l'uso delle sole variabili primarie per proiettare in futuro le variazioni di consumi energetici per il raffrescamento degli ambienti in cui vivremo. Ad ogni modo è possibile definire degli scenari degli ambienti, determinati dal clima futuro, in cui gli edifici saranno immersi.

Bibliografia (Parte 1, 3)

La bibliografia ed i riferimenti della parte 2 sono inseriti di volta in volta in ogni capitolo e sottocapitolo

Adams H.D., Zeppel M.J.B., Anderegg W.R.L., et al. (2017) - A multi-species synthesis of physiological

Adloff F, Somot S, Sevault F, Jordà G, Aznar R, Déqué M, Herrmann M, Marcos M, Dubois C, Padorno E, Alvarez‐Fanjul E, Gomis D (2015) – Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios. Climate Dynamics, Vol. 45, 2775-2802.

Aeschimann, D., Lauber, K., Moser, M., Theurillat, J.P. (2004) - *Flora Alpina*. Zanichelli, Bologna.

AIA, Associazione Italiana Allevatori. (2016) Quadro economico e relazione attività 2015.Associazione Italiana allevatori, Roma

Albouy C, Guilhaumon F, Araujo MB, Mouillot D, Leprieur F (2012) Combining projected changes in species richness and composition reveals climate change impacts on coastal Mediterranean fish assemblages. Global Change Biology, 18, 2995–3003.

Albouy C, Mouillot D, Rocklin D, Culioli J, Le Loc'h F (2010) Simulation of the combined effects of artisanal and recreational fisheries on a Mediterranean MPA ecosystem using a trophic model. Marine Ecology Progress Series, 412, 207–221.

Allen C.D, Macalady A.K., Chenchouni H., et al. (2010) - A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management*, vol. 259, 660-684.

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998) - *Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56*, FAO – Food and Agricolture Organization of the United Nations (www.fao.org/docreo)

AMS-GLOS (2017) Meteorology Glossary – American Meteorological Society http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page

Antonioli F, Amorosi A, Correggiari A, Doglioni C, Fontana A, Fontolan G, Furlani S, Ruggieri R, Spada G (2009) – Relative sea-level rise and asymmetric subsidence in the northern Adriatic. *Rendiconti Online, Società Geologica Italiana*, Vol. 9, 5-8.

APAT (2006) – *Stazioni di osservazione Meteo-Mareografiche nella laguna di Venezia e nell'arco costiero Nord Adriatico.* Rapporti 68/2006, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici. I.G.E.R. srl, Roma, 74 pp.

AR5 (2014) - Climate Change 2014 – Synthesis Report – IPCC https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/

Arft, A.M., Walker, M.D., Gurevitch, J., Alatalo, J.M., Bret-Harte, M.S., Dale, M., Diemer, M., Gugerli, F., Henry, G.H.R., Jones, M.H., Hollister, R.D., Jonsdottir, I.S., Laine, K., Levesque, E., Marion, G.M., Molau, U., Molgaard, P., Nordenhall, U., Raszhivin, V., Robinson, C.H., Starr, G., Stenstrom, A., Stenstrom, M., Totland, O., Turner, P.L., Walker, L.J., Webber, P.J., Welker, J.M., Wookey, P.A. (1999) - Responses of Tundra Plants to Experimental Warming: Meta-Analysis of the International Tundra Experiment. *Ecological Monography*, Vol 69, 491. https://doi.org/10.2307/2657227

ARPA_FVG (2013) ARPA FVG – Inventario regionale delle emissioni in atmosfera aggiornamento al 2013, http://www.arpa.fvg.it/cms/tema/aria/pressioni/Catasto_emissioni/catasto.html

Azzurro E, Moschella P, Maynou F (2011) Tracking signals of change in Mediterranean fish diversity based on local ecological knowledge. PLoS ONE, 6, e24885.

Bagnouls F., Gaussen H., 1957 – Les climats biologiques et leur classification. Ann. Geogr., 66, 355: 193-220.

Balch, E.S., 1900. Glacières or Freezing Caverns. Philadelphia Allen, Lane & Scott reprinted 1970 by Johnson Reprint Corp., New York (38 pp.).

Baldin G (2017) – *Laguna di Venezia. Trend di subsidenza da analisi dati GPS.* ISPRA, Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera, la climatologia marina e l'oceanografia operativa, Area Maree e Lagune, Venezia, 24 pp.

Bär, A., Bräuning, A., Löffler, J. (2006) - Dendroecology of dwarf shrubs in the high mountains of Norway – A methodological approach. *Dendrochronologia*, Vol. 24, 17–27. https://doi.org/10.1016/j.dendro.2006.05.001

Bär, A., Pape, R., Bräuning, A., Löffler, J. (2008) - Growth-ring variations of dwarf shrubs reflect regional climate signals in alpine environments rather than topoclimatic differences. *Journal of Biogeogrphy*, Vol. 35, 625–636. https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2007.01804.x

Barber A.V., Junday G.P., Finney B.P. (2000) - Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. Nature, vol. 450, 668-673.

Becker M., Levy G. (1989). A proposito del deperimento delle foreste; clima, selvicoltura e vitalità dell'abetina dei Vosgi. L'Italia Forestale e Montana, vol. 2, 85-106.

Benestad R, Haensler A., Hennemuth B., Illy T., Jacob D., Keup-Thiel E., Kotlarski S., Nikulin G., Otto J., Rechid D., Sieck K., Sobolowski S., Szabó P., Szépszó G., Teichmann C., Vautard R., Weber T., Zsebeházi G: (2017) - Guidance for EURO-CORDEX climate projections data use., Version1.0 http://www.euro-cordex.net/imperia/md/content/csc/cordex/euro-cordex-guidelines-version1.0-2017.08.pdf

Berman, A. J. 2005. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. J.Anim. Sci. 83:1377-1384.

Bernetti G (2007). I nomi delle fasce di vegetazione. In: "Botanica e Selvicoltura". Accademia Italiana di Scienze Forestali, Firenze, Italy, pp. 113-120.

Bernetti G. (1995) - Selvicoltura speciale. UTET, 416 pp.

Bigler C., Gricar J.M., Bugmann H., Cufar K. (2004) - Growth patterns as indicators of impending tree death in silver fir. Forest Ecology and Management, vol. 199, 183-190.

Birchenough, Silvana N. R, Henning H, Degraer S., Mieszkowska N.,Borja A.,Buhl-Mortensen L., Braeckman, U., Craeymeersch, J., De Mesel I., Kerckhof, F. (2015) Climate change and marine benthos: a review of existing research and future directions in the North Atlantic. Wiley Interdisciplinari Reviews – Climate Change Vol. 6 (2): 203-223Cabrini M, Fornasaro D, Cossarini G, Lipizer M, Virgilio D (2012) Phytoplankton temporal changes in a coastal northern Adriatic site during the last 25 years. Estuarine Coastal and Shelf Science, 115, 113-124.

Bray, J.R., Curtis, J.T., 1957. An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin. Ecol. Monogr. 27, 325–349. https://doi.org/10.2307/1942268

Brodribb T.J., Cochard H. (2009) Hydraulic failure defines the recovery and point of death in water-stressed conifers. *Plant Physiology*, vol. 149, 575-584.

Caloi P (1938) – Sesse dell'Alto Adriatico con particolare riguardo al Golfo di Trieste. *Memorie del R. Comitato Talassografico Italiano del CNR*, n. CCXLVIII, 3-39.

Carillo A, Sannino G, Artale V, Ruti P M, Calmanti S, Dell'Aquila A (2012) – Steric sea level rise over the Mediterranean Sea: present climate and scenario simulations. *Climate Dynamics*, Vol. 39, 2167-2184.

Castellari S., Venturini S., Giordano F., Ballarin Denti A., Bigano A., Bindi M., Bosello F., Carrera L., Chiriacò M.V., Danovaro R., Desiato F., Filpa A., Fusani S., Gatto M., Gaudioso D., Giovanardi O., Giupponi C., Gualdi S., Guzzetti F., Lapi M., Luise A., Marino G., Mysiak J., Montanari A., Pasella D., Pierantonelli L., Ricchiuti A., Rudari R., Sabbioni C., Sciortino M., Sinisi L., Valentini R., Viaroli P., Vurro M., Zavatarelli M. (2014) Elementi per una Strategia Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), Roma.

CE, 2007. DIRETTIVA 2007/60/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 23 ottobre 2007 relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni.

CGA6 (2013) – 6° Censimento Generale dell'Agricoltura in Friuli Venezia Giulia, (2013), Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, http://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/GEN/statistica/Allegati/Agricoltura_FVG_luglio_2013.pdf

Chinellato A., Munari M., Matozzo V., Bressan M., Marin M.G. (2010) First attempts in evaluating acidification effects on physiological responses in Mytilus galloprovincialis. Comp. Biochem. Physiol. Part A 157, S13

Choat B., Brodribb T.J., Jansen S., et al. (2012) - Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature*, vol. 491, 752-755.

Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne GA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D, Unnikrishnan AS (2013) – Sea Level Change; in Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Ed., 1552 pp.

Ciais P., Schelhaas M.J., Zaehle S., et al. (2008) - Carbon accumulation in European forests. Nature geoscience, vol. 1, 425-429.

CIESM (2008) Impacts of acidification on biological, chemical and physical systems in the Mediterranean and Black Seas. N° 36 in CIESM Workshop Monographs [F. Briand Ed.], 124 p., CIESM Publisher, Monaco

CNV (2010) – III Convegno Nazionale di Viticoltura - 2010, Libro dei Riassunti file:///C:/Users/arpa800090/Downloads/Libro_Riassunti_CONAVI.pdf

Collier R.J., Hall L.W., Rungruang S., Zimbleman R.B. (2012) Quantifying heat stress and its impact on metabolism and performance. Proc. 23rd Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium, Gainesville, University of Florida, Gainesville, 74–84

Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne J-L, Fichefet T, Friedlingstein P, Gao X, Gutowski WJ, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver AJ, Wehner M (2013) – Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility; in Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Ed., 1552 pp.

Colucci R.R. (2016). Geomorphic influence on small glacier response to post Little Ice Age climate warming: Julian Alps, Europe. Earth Surface Processes and Landforms, 41: 1227-1240

Colucci R.R., Boccali C., Žebre M., Guglielmin M. (2016) Rock glaciers, protalus ramparts and pronival ramparts in the south-eastern Alps. Geomorphology, 269: 112-121 doi: 10.1016/j.geomorph.2016.06.039

Colucci R.R., Fontana D., Forte E., Potleca M., Guglielmin M. (2016). Response of ice caves to weather extremes in the Southeastern Alps, Europe. Geomorphology, 261: 1-11

Colucci R.R., Giorgi F., Torma C. (2017). Unprecedented heat wave in December 2015 and potential for winter glacier ablation in the eastern Alp. Scientific Reports, Nature, 7: 7090 doi: 10.1038/s41598-017-07415-1

Colucci R.R., Guglielmin M. (2015) Precipitation-temperature changes and evolution of a small glacier in the southeastern European Alps during the last 90 years. International Journal of Climatology, 35:10 2783-2797

Colucci R.R., Žebre M. (2016) Late Holocene evolution of glaciers in the southeastern Alps Journal of Maps, 12: 289-299. doi: 10.1080/17445647.2016.1203216

Conte D, Lionello P (2013) – Characteristics of large positive and negative surges in the Mediterranean Sea and their attenuation in future climate scenarios. *Global and Planetary Change*, Vol. 111, 159–173.

Conversi A, Peluso T, Fonda Umani S (2009) Gulf of Trieste: a changing ecosystem. Journal of Geophysical Research, 114, C03S90

Corona E. (1983) - Ricerche dendrocronologiche preliminari sull'abete bianco di Vallombrosa. Annali dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali, vol. XXXII, 149-163

Cossarini G, Libralato S, Salon S, Gao X, Giorgi F, Solidoro C (2008) Downscaling experiment for the lagoon of Venice. Part II: potential effects of changes in precipitation on biogeochemical properties. Climate Research, 38, 43-59

Cossarini G, Solidoro C, Fonda Umani S (2012) – Dynamics of biogeochemical properties in temperate coastal areas of freshwater influence: Lessons from the Northern Adriatic Sea (Gulf of Trieste). Estuarine Coastal and Shelf Science, Vol. 116, 65-74.

Cozzi S, Falconi C, Comici C, Cermelj B, Kovac N, Tirk V, Giani M (2012). Recent evolution of river discharges in the Gulf of Trieste and their potential response to climate changes and anthropogenic pressure. Estuarine Coastal and Shelf Science, 115, 14-24.

Cozzi S, Giani M (2011) River water and nutrient discharges in the northern Adriatic Sea: current importance and long term changes. Continental Shelf Research, 31, 1881-1893

Cucchi F., Piano C., Marinetti E., Massari G., Oberti S., Zini L. (2000) - Studies for the realization of the Hydrogeological map of Friuli Venezia Giulia. *Ipogea*, 3: 57-71

Danuso F., Contin M., Gani M. e Giovanardi R. (1992). BIDRICO: bilancio idrico colturale - Manuale d'uso e di riferimento. ERSA-FVG, Gorizia, 95 pag.

Danuso F., Franz D., Giovanardi R. (1999) - Valutazione per punti e per aree omogenee del rilascio in falda di azoto da terreni agricoli. Atti 3° Conferenza Nazionale ASITA, Napoli, 9-12 novembre 1999

Danuso F., Gani M. e Giovanardi R. (1995). Field water balance: BIdriCo 2. In "Crop Water models in practice" L.S. Pereira, B.J. Van den Broek, P. Kabat and R.G. Allen, pag. 49-73, Wageningen Pers (ISBN 90-74134-26-2).

Danuso F., Giovanardi R. e Franz D. (1998) - Il reperimento e trattamento delle informazioni agro-ambientali. In "Al confine del nord-est" a cura di P.L. Paolillo, pag.136-172, Forum, Ed. Univ. Udinese, Udine.

Danuso F., Rocca A., (2014**) -**. SEMoLa: a simple and easy modelling language. Ecological Modelling, 285C (2014), pp. 54-77. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2014.04.012

De Martonne E. (1926). Une nouvelle fonction climatologique: l'indice d'aridité. La Météorologie 1 449-459. [The earlier formulation of the aridity index].

De Philippis A (1937). Classificazioni ed indici del clima in rapporto alla vegetazione forestale italiana. Nuovo Giornale Botanico Italiano 44: 1-169.

De Philippis A. (1958). Lezioni di selvicoltura speciale. Università degli Studi di Firenze, pp. 199-212.

De Silva, S.S. and Soto, D. 2009. Climate change and aquaculture: potential impacts, adaptation and mitigation. In K. Cochrane, C. De Young, D. Soto and T. Bahri (eds). Climate change implications for fisheries and aquaculture: overview of current scientific knowledge. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper. No. 530. Rome, FAO. pp. 151-212.

Djakovac T, Supić N, Bernardi Aubry F, Degobbis D, Giani M (2015). Mechanisms of hypoxia frequency changes in the northern Adriatic Sea during the period 1972–2012. Journal of Marine Systems, 141, 179-189.

Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979). Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.

Dulcic J, Grbec B, Lipej L, Beg Paklar G, Supicic N, Smirc A (2004) The effect of the hemispheric climatic oscillations on the Adriatic ichthyofauna. Fresenius Environmental Bulletin, 13, 293e298.

Ellenberg, H.H. (1988) - *Vegetation Ecology of Central Europe*, 4th edn. ed. Cambridge University Press, Cambridge; New York.

ERSA-BBCH (2017) Scheda fenologia vite: descrizione BBCH ed equivalenza con Baggiolini. http://www.ersa.fvg.it/difesa-e-produzione-integrata/difesa-integrata-obbligatoria/bollettini-fitosanitari/vite

ERSA-SIP (2017) - http://www.ersa.fvg.it/tematiche/suoli-e-carte-derivate/informazioni-generali/sistema-informativo-pedologico - Sistema Informativo Pedologico dell'Agenzia Regionale per lo Sviluppo Rurale

EU-CORDEX, (2017) - EURO-CORDEX Coordinated Downscaling Experiment - European Domain http://www.euro-cordex.net/

Falace A, Alongi G, Cormaci M, Furnari G, Curiel D, Cecere E, Petrocelli A (2010) Changes in the benthic algae along the Adriatic Sea in the last three decades. Chemistry and Ecology, 26 (Suppl.), 77-90.

FAO (2010) Aquaculture development. 4. Ecosystem approach to aquaculture. FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries. No. 5, Suppl. 4. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome 53p

FAO (2017) - AquaCrop 6.0 Reference Manual (2017) FAO - http://www.fao.org/3/a-br244e.pdf

Felde, V.A., Kapfer, J., Grytnes, J.-A. (2012) - Upward shift in elevational plant species ranges in Sikkilsdalen, central Norway. *Ecography*, Vol. 35, 922–932. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2011.07057.x

Fernández-Calvo, I.C., Obeso, J.R. (2004) - Growth, nutrient content, fruit production and herbivory in bilberry Vaccinium myrtillus L. along an altitudinal gradient. *Forestry*, Vol. 77, 213–223. https://doi.org/10.1093/forestry/77.3.213

Ficke A.D., Myrick C.A., Hansen L.J. (2007) Potential impacts of global climate change on freshwater fisheries. Reviews in Fish Biology and Fisheries 17: 581-613

Fidler A., vanDevender K. (2011) Heat stress in dairy cattle. FSA3040. Agriculture and Natural Resources. University of Arkansas Division of Agriculture Research & Extension

Fonda Umani S, Del Negro P, Larato C, De Vittor C, Cabrini M, Celio M, Falconi C, Tamberlich F, Azam F (2007) Major inter-annual variations in microbial dynamics in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea) and their ecosystem implications. Aquatic Microbial Ecology, 46, 163-175.

Fucks D, Ivancic I, Najdek M, Lucic D, Njire J, Godrijan J, Maric D, Silovic T, Paliaga P, Blazina M, Precali R, Orlic S (2012) Changes in the planktonic community structure related to trophic conditions: the case of the northern Adriatic Sea. Journal of Marine Systems, 96-97, 95-102.

FVG (1990) – Studio sulla situazione altimetrica della zona compresa tra Latisana, Cervignano, Ronchi, Punta Sdobba, Grado, Porto Buso, Punta Tagliamento con la costituzione di nuovo capisaldi. Relazione di sintesi. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Direzione Regionale dell'Ambiente. Liberio Nicolò – Marine Survey & C., Lavori Marini s.n.c., Trieste, 114 pp.

FVG (2017) – *Carte numeriche regionali.* Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, irdat.regione.fvg.it/CTRN/ricerca-cartografia/ (ultimo accesso 14/6/2017).

Galli G, Solidoro C, Lovato T (2016) Marine heat waves hazard 3D maps, and the risk for low motility organisms in a warming Mediterranean Sea. Frontiers in Marine Science 4, 136.

Gallucci V., Urbinati C. (2009) - Dinamismi di accrescimento e sensitività climatica dell'abete bianco (Abies alba Mill.) nel SIC Alpe della Luna-Bocca Trabaria (PU). Forest@, vol. 6, 85-99.

Gambetti D., Lo Vecchio G., Nanni T., Schweingruber F.H. (2000) - Climate and site dependence of the annual growth of silver fir (Abies alba Mill.) in the Northern Apennines, Italy. Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica C, vol. 23, 111-131.

Gazeau F, Gattuso JP, Dawber C, Pronker AE, Peene F, Peene J, Heip CHR, Middelburg JJ (2010) Effect of ocean acidification on the early life stages of the blue mussel Mytilus edulis, 7 (7), 2051-2060.

Gazeau F., Quiblier C., Jansen J.M., Gattuso J.P., Middelburg J.J., Heip C.H.R. (2007) Impact of elevated CO2 on shellfish calcification. Geophysical Research Letters 34: L07603

Gentilesca T., Todaro L. (2008). Crescita radiale e risposte climatiche dell'abete bianco (Abies alba Mill.) in Basilicata. Forest@, vol. 5, 47-56.

Ghezzo M., Saretta A., Sigovini M., Guerzoni S., Tagliapietra D., Umgiessera D. (2011) Modeling the inter-annual variability of salinity in the lagoon of Venice in relation to the water framework directive typologies. Ocean & Coastal Management Vol. 54, Issue 9, 706-719

Giani M, Djakovac T, Degobbis D, Cozzi S, Solidoro C, Fonda Umani S (2012) Recent changes in the marine ecosystems of the northern Adriatic Sea. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 115, 1-13.

Gleason S.M., Westboy M., Jansen S., et al. (2016) - Weak tradeoff between xylem safety and xylem-specific hydraulic efficiency across the world's wood' plant species. *New Phytologist*, vol. 209, 123-136.

Gomis D, Tsimplis M, Marcos M, Fenoglio-Marc L, Pérez B, Raicich F, Vilibić I, Wöppelmann G, Monserrat S (2012) – Mediterranean Sea Level Variability and trends; in Lionello P, *The climate of the Mediterranean region: from past to the future*. Elsevier, Dordrecht, Paesi Bassi, 590 pp.

Goslee, S.C., Urban, D.L., others (2007) - The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data. *Journal of Statistical Software*, Vol. 22, 1–19.

Griffith A.W. & Gobler C. (2017) Transgenerational exposure of North Atlantic bivalves to ocean acidification renders offspring more vulnerable to low pH and additional stressors. Scientific Reports 7, Article number: 11394

Gumbel E.J. (1935). Les valeurs extrêmes des distributions statistiques. Annales de l'Institut Henri Poincaré, 5 (2): 115–158.

Hacke U.G., Spicer R., Schreiber S.G., Plavcová L. (2017) - An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. *Plant, Cell and Environment*, vol. 40, 831-845.

Hallinger, M., Manthey, M., Wilmking, M. (2010) - Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia. *New Phytologist*, Vol. 186, 890–899. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03223.x

Hanewinkel M., Cullmann D.A., Schelhaas M.J, Nabuurs, G.J., Zimmermann N.E. (2012) Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. Nature Climate Change, vol. 3, 203-207.

Hatcher M.J. & Dunn A.M. (2011) Parasites in Ecological Communities. From Interaction to Ecosystems. Cambridge University Press, Cambridge

Heinrich M. 1906 - Fremdländische Wald- und Parkbäume für Europa ed. Berlin P. Parey (https://archive.org/details/fremdlndischew00mayruoft)

Hember R.A., Kurz W.A., Coops N.C. (2017) - Relationships between individual-tree mortality and water-balance variables indicate positive trends in water stress-induced tree mortality across North America. *Global Change Biology*, vol. 23, 1691-1710.

Hinder S.L., Hays G.C., Edwards M., Roberts E.C., Walne A.W., Gravenor M.B. (2012) Changes in marine dinoflagellate and diatom abundance under climate change. Nature Climate Change 2: 271–275

Hoegh-Guldberg O, Bruno JF (2010) The impact of climate change on the world's marine ecosystems. Science, 328, 1523-1528.

Holmlund, P., Onac, B.B., Hansson, M., Holmgren, K., Mörth, M., Nyman, M., Perşoiu, A., 2005. Assessing the palaeoclimatic potential of cave glaciers: the example of the Scarisoara Ice Cave (Romania). Geogr. Ann. 87 A (1), 193–201. http://www.euro-cordex.net/

IPCC (2007) Climate change 2007: The physical science basis: Contribution of working group I to the 4th assessment report of the Intergovernamental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York.

ISMEA-IPSOA (2011) Il mercato dei prodotti ittici in Italia. http://www.ismea.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/6483

ISPRA, 2013. Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici. ISPRA manuali e linee Guida 84/13 ISBN 978-88-448-0584-5.

ISTAT (2017) - Stima delle superfici e produzioni delle coltivazioni agrarie, floricole e delle piante intere da vaso http://dati.istat.it/

ISTAT-RAFVG (2013) - Dimensione Economica e Specializzazioni dell'Agricoltura del Friuli Venezia Giulia al 2010 –(2013) ISTAT e Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – ISBN 978-88-458-1774-8 http://www.regione.fvg.it/rafvg/export/sites/default/RAFVG/GEN/statistica/Allegati/CENSIMENTOAGRICOLTURA.pdf -

Jordà G, Gomis D, Álvarez-Fanjul E, Somot S (2012) – Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, Vol. 80–81, 198–214.

Kamburska L, Fonda Umani S (2006) Long-term copepod dynamics in th Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea): a recent changes and trends. Climate Research, 31, 195-203.

Kannan N., Santhi C., Williams J. R., Arnold J. G. (2008) - Development of a continuous soil moisture accounting procedure for curve number methodology and its behavior with different evapotranspiration methods. *Hydrological Processes*, 22, 2114–2121. doi:10.1002/hyp.6811.

Kelly A.E., Goulden M.L. (2008) - Rapid shifts in plant distribution with recent climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 105, 11823-11826.

Klanderud, K., Birks, H.J.B. (2003) - Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *The Holocene* Vol. 13, 1–6. https://doi.org/10.1191/0959683603hl589ft

Köppen W., 1936 - Das geographische System der Klimate. In: Handbuch der Klimatologie (Köppen W., Geiger R. eds). IC, Berlin, Germany

Kralj M, Čermelj B, Celio M, Lipizer M, France J, Giani M, Brunetti F, Mozetič P (2017) Multidecadal frequency of bottom hypoxia in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea) and recent events (2015-2016). 52 European Marine Biology Symposium, Piran (Slo), 25-29 settembre, 2017.

Kumordzi, B.B., Gundale, M.J., Nilsson, M.-C., Wardle, D.A. (2016) - Shifts in Aboveground Biomass Allocation Patterns of Dominant Shrub Species across a Strong Environmental Gradient. *PLOS ONE* Vo. 11, e0157136. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157136

La Marca O. (2017) – Elementi di dendrometria. Patron Editore, 530 pp.

Lacoue-Labarthe T, Nunes PALD, Ziveri P, Cinar M, Gazeau F, Hall-Spencer J, Hilmi N, Moschella P, Safa A, Sauzade D, Turley C (2016) Impacts of ocean acidification in a warming Mediterranean Sea: An overview. Regional Studies in Marine Science, 5, 1-11.

Lama R, Corsini S (2000) – *La rete mareografica italiana*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, Roma, 259 pp.

Larcher W. (2003) - Physiological Plant Ecology, 4th Ed. Springer-Verlag.

Lazzari P, Mattia G, Solidoro C, Salon S, Crise A, Zavatarelli M, Oddo P, Vichi M (2014) – The impacts of climatic change and environmental management policies on the trophic regimes in the Mediterranean Sea: Scenario analyses. *Journal of Marine Systems*, Vol. 135, 137-149.

Lefcheck, J.S. (2015) - piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods Ecology and Evolution* n/a-n/a. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512

Lefcheck, J.S. (2016) -piecewiseSEM: Piecewise structural equation modelling in r for ecology, evolution, and systematics. *Methods Ecology and Evolution*, Vol. 7, 573–579. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12512

Libralato S, Caccin A, Pranovi F (2015) Modeling species invasions using thermal and trophic niche dynamics under climate change. Frontiers in Marine Science, 2, 29 |doi.org/10.3389/fmars.2015.00029

Lichstein, J.W. (2007) - Multiple regression on distance matrices: a multivariate spatial analysis tool. *Plant Ecology*, Vol. 188, 117–131. https://doi.org/10.1007/s11258-006-9126-3

Lionello P, Cavaleri L, Nissen K, Pino C, Raicich F, Ulbrich U (2012b) – Severe marine storms in the Northern Adriatic: Characteristics and trends. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 40-41, 93-105.

Lionello P, Galati MB, Elvini E (2012a) – Extreme storm surge and wind wave climate scenario simulations at the Venetian littoral. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 40-41, 86–92.

Luetscher, M., Jeannin, P., Haeberli, W., 2005. Ice caves as an indicator of winter climate evolution: a case study from the Jura Mountains. The Holocene 15, 982–993.

Luetscher,M., Jeannin, P.Y., 2004. A process-based classification of alpine ice caves. Theor. Appl. Karstol. 17, 5–10.

Malačič V, Celio M, Čermelj B, Bussani A, Comici C (2006) – Interannual evolution of seasonal thermohaline properties in the Gulf of Trieste (northern Adriatic) 1991-2003. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, C08009.

Manetti M.C., Cutini A. (2006). Tree-ring growth of silver fir (Abies alba Mill.) in two stands under different silvicultural systems in central Italy. Dendrochronologia, vol. 23, 145-150. Manetti M.C., Cutini A. (2006). Tree-ring growth of silver fir (Abies alba Mill.) in two stands under different silvicultural systems in central Italy. Dendrochronologia, vol. 23, 145-150.

Marchesini C (2006) – Vertical movements in the Grado Lagoon (Italy) measured with various methods. *Atti del 12th FIG Symposium on Deformation Measurements* (Baden, 22-24 maggio 2006), www.fig.net/resources/proceedings/index.asp (ultimo accesso 16/10/2017).

Marcos M, Tsimplis MN (2008) – Coastal sea level trends in southern Europe. *Geophysical Journal International*, Vol. 175, 70–82.

Marques A., Nunes M.L., Moore S., Strom M. (2010) Climate change and seafood safety: human health implications. Food Research International 43 (7): 1766–1779

Marullo S, Artale V, Santoleri R (2011) – The SST Multidecadal Variability in the Atlantic-Mediterranean Region and Its Relation to AMO. *Journal of Climate*, Vol. 24, 4385-4401.

Matozzo V., Chinellato A., Munari M., Finos L.,Bressan M., Marin M.G. (2012) First Evidence of Immunomodulation in Bivalves under Seawater Acidification and Increased Temperature. Plos One, 7 (3) PMC3313930

Mazzolini M., 2017, Comunicazione personale, Agenzia per l'Energia del Friuli Venezia Giulia http://www.ape.fvg.it/

McDowell N.G., Beerling D.J., Breshears D.D., Fisher R.A, Raffa K.F., Stitt M. (2011) - The interdependence of mechanisms underlying climate-driven vegetation mortality. *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 26, 523-532.

mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution*, vol. 1, 1285-1291.

Mel R, Sterl A, Lionello P (2013) – High resolution climate projection of storm surge at the Venetian coast. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, 1135–1142.

Melaku Canu D, Solidoro C, Cossarini G, Giorgi F (2011) Effect of global change on bivalve rearing activity and the need for adaptive management. Climate Research, 42 (1), 13-26.

Meyhoff Fry J., (2012) Carbon Footprint of scottish suspended mussels and intertidal oysters. Scottish Aquaculture Research Forum 078 http://wwww.sarf.org.uk

Michelutti G., Barbieri S., Bianco D., Zanolla S., Casagrande G. (2006). Suoli e paesaggi del Friuli Venezia Giulia - 2. Province di Gorizia e Trieste. ERSA, Servizio ricerca e sperimentazione, (volume 648 pp. con allegata Carta dei suoli).

Michelutti G., Zanolla S. e Barbieri S. (2003). Suoli e paesaggi del Friuli Venezia Giulia - 1. Pianura e colline del pordenonese. ERSA, Servizio della sperimentazione agraria, (volume 510 pp. e relativa Carta dei suoli).

Monti M, Minocci M, Milani L, Fonda Umani S (2012) Seasonal and interannual dynamics of microzooplankton abundances in the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea, Italy). Estuarine Coastal and Shelf Science, 115, 149-157.

Mozetic P, France J, Kogovsek T, Talaber I, Malej A (2012) Plankton trends and community changes in a coastal sea: bottom-up vs top.down control in relation to local scale and larg-scale drivers. Estuarine Coastal and Shelf Science, 115, 138-148.

Mozetic P, Solidoro C, Cossarin G, Socal G, Precali R, Francé J, Bianchi , De Vittor C, Smodlaka N, Fonda Umani S (2010) Recent trends towards oligotrophication of the northern Adriatic: evidence from chlorophyll a time series. Estuaries and Coast, 33, 362-375.

Mucina, L., Grabherr, G., Ellmauer, T., Wallnöfer, S. (1993) - *Die Pflanzengesellschaft Österreichs: Teil I: Anthropogene Vegetation. Teil II: Natürliche waldfreie Vegetation.Teil III*: Wälder und Gebüsche, Auflage: 1. ed. Spektrum Akademischer Verlag.

Muscio G., Mocchiutti A. (2009) Andar per Grotte, Monografia. Provincia di Udine & Circolo Speleologico ed idrologico Friulano 2009

Nardini A., Battistuzzo M., Savi T. (2013) - Shoot desiccation and hydraulic failure in temperate woody angiosperms during an extreme summer drought. *New Phytologist*, vol. 200, 322-329.

Nardini A., Casolo V., Dal Borgo A., Savi T., Stenni B., Bertoncin P., Zini L., McDowell N.G. (2016) - Rooting depth, water relations and non-structural carbohydrate dynamics in three woody angiosperms differentially affected by an extreme summer drought. *Plant, Cell and Environment*, vol. 39, 618-627.

Nardini A., Savi T., Novak M. (2014) - Droughts, heat waves and plant hydraulics: impact and legacies. *Agrochimica*, vol. 58, 146-161.

Nardone A., Ronchi B., Lacetera N., Ranieri M.S., Bernabucci U. (2010) Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. Livestock Science, Vol.130, 57–69

Neitsch S.L., Arnold J.G., Kiniry J.R., Williams J.R. (2005) - *SWAT: Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation* . Texas A&M University.

O'Brien M.J., Engelbrecht B.M.J., Joswig J., et al. (2017) - A synthesis of tree functional traits related to drought-induced mortality in forests across climatic zones. *Journal of Applied Ecology*, vol. 54, 1669-1686.

Orel G, Aleffi F, Rinaldi A, Fonda Umani S (1993) Ipossie e anossie di fondali marini: l'alto Adriatico e il golfo di Trieste. Regione autonoma Friuli Venezia Giulia, Direzione regionale dell'ambiente, 104 pp.

Orr J.C., Fabry V.J., Aumont O., Bopp L., Doney S.C. (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437:681–686

PAR (2011); Piano di Azione Regionale per il contenimento degli episodi acuti di inquinamento atmosferico, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2011, http://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/pianificazione-gestione-territorio/FOGLIA2/

Perşoiu, A., Onac, B.P., 2012. Ice in caves. In: White,W.B., Culler, D.C. (Eds.), Encyclopedia of Caves, second ed. Elsevier, pp. 399–404.

Pesaresi S., Galdenzi D., Biondi E., Casavecchia S. 2014 - Bioclimate of Italy: application of the worldwide bioclimatic classification system Journal of Maps Vol. 10 , Iss. 4,2014 pp 538-553

Petrucco L., Nardini A., von Arx G., Saurer M., Cherubini P. (2017) - Isotope signals and anatomical features in tree rings suggest a role for hydraulic strategies in diffuse drought-induced die-back of *Pinus nigra*. *Tree Physiology*, vol. 37, 523-535.

Philippart CJM, Anadon R, Danovaro R, Dippner JW, Drinkwater KF, Hawkins SJ, Oguz T, O'Sullivan G, Reid PC (2011) Impacts of climate change on European marine ecosystems: Observations, expectations and indicators. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 400, 52-69

Piao S. L., Ciais P., Friedlingstein P., Peylin P., et al. (2008) - Net carbon dioxide losses of Northern ecosystems in response to autumn warming. Nature, vol. 451, 49-53.

Pignatti G, 2011. La vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia. Forest@ 8: 1-12 [online: 2011-02-17] URL: http://www.sisef.it/forest@/

Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., Heisterkamp, S., Van Willigen, B., Maintainer, R. (2017) - Package 'nlme.' Linear Nonlinear Mix. Eff. Models Version 3–1.

Pinna M., 1977. Climatologia , UTET, Torino, 1977.

Planton S, Lionello P, Artale V, Aznar R, Carrillo A, Colin J, Congedi L, Dubois C, Elizalde A, Gualdi S, Hertig E, Jacobeit J, Jordà G, Li L, Mariotti A, Piani C, Ruti P, Sanchez-Gomez E, Sannino G, Sevault F, Somot S, Tsimplis M (2012) – The Climate of the Mediterranean Region in Future Climate Projections; in Lionello P, *The climate of the Mediterranean region: from past to the future*. Elsevier, Dordrecht, Paesi Bassi, 590 pp.

PMRQA (2010), Piano di Miglioramento della Qualità dell'Aria, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, 2010 http://www.regione.fvg.it/rafvg/cms/RAFVG/ambiente-territorio/pianificazione-gestione-territorio/FOGLIA2/

Poldini L. (1989) - La Vegetazione del Carso Isontino e Triestino. Edizioni Lint Trieste.

Poldini, L., Oriolo, G., Francescato, C. (2004) - Mountain pine scrubs and heaths with Ericaceae in the south-eastern Alps. *Plant Biosystems*, Vol. 138, 53–85. https://doi.org/10.1080/11263500410001684125

Polsky L., von Keyserlingk M.A.G. (2017) Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. Journal of Dairy Science, Vol.100, 1–13

Pyrke, A.F., Kirkpatrick, J.B. (1994) - Growth rate and basal area response curves of four Eucalyptus species on Mt. Wellington, Tasmania. *Journal of Vegetation Sconce*, Vol. 5, 13–24. https://doi.org/10.2307/3235633

Querin S, Crise A, Deponte D, Solidoro C (2006) – Numerical study of the role of wind forcing and freshwater buoyancy input on the circulation in a shallow embayment (Gulf of Trieste, Northern Adriatic Sea). *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, C03S16.

R Core Team (2017) - *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*. www.r-project.org

RAFVG, 2015. Impatti dei cambiamenti climatici sul territorio fisico regionale. Relazione di sintesi, Studio corredato da cartografia e relazione di sintesi geologica e geotematica sullo stato di fatto concernente la conoscenza d'insieme del territorio fisico regionale per la valutazione degli impatti dovuti ai cambiamenti climatici.

Raicich F (2010) – On the contributions of atmospheric pressure and wind to daily sea level changes in the northern Adriatic Sea. *Continental Shelf Research*, Vol. 30, 1575-1581.

Raicich F (2015) – Long-term variability of storm surge frequency in the Venice Lagoon: an update thanks to 18th century sea level observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 15, 527-535.

Raicich F, Orlić M, Vilibić I, Malačič V (1999) – A case study of the Adriatic seiches (December 1997). *Il Nuovo Cimento C*, Vol. 22, 715-726.

Range P., Chicharo M.A., Ben-Hamadou R., Pilò D., Matias D., Joaquim S., Olivera A.P., Chicharo L. (2011) Calcification, growth and mortality of juvenile clams Ruditapes decussatus under increased pCO2 and reduced pH: variable responses to ocean acidification at local scales? J. Exp. Mar. Ecol. 396: 177-184

Ravagnolo O., Misztal I., Hoogenboom G. (2000) Genetic Component of Heat Stress in Dairy Cattle, Development of Heat Index Function. Journal of Dairy Science, Vol.83, 2120-2125

Ravaioli M, Bergami C, Riminucci F, Langone L, Cardin V, Di Sarra A, Aracri S, Bastianini M, Bensi M, Bergamasco A, Bommarito C, Borghini M, Bortoluzzi G, Bozzano R, Cantoni C, Chiggiato J, Crisafi E, D'Adamo R, Durante S, Fanara C, Grilli F, Lipizer M, Marini M, Miserocchi S, Paschini E, Penna P, Pensieri S, Pugnetti A, Raicich F, Schroeder K, Siena G, Specchiulli A, Stanghellini G, Vetrano A, Crise A (2016) – The RITMARE Italian Fixed-point Observatory Network (IFON) for marine environmental monitoring: a case study. *Journal of Operational Oceanography*, Vol. 9, Supp. 1, s202-s214.

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (2003) - Progetto MOLAND-FVG sul consumo ed uso del territorio nel Friuli Venezia Giulia. Direzione regionale della pianificazione territoriale, realizzazione a cura del CCR della Commissione Europea, Ispra (VA).

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (2005) - La prevenzione del rischio idrogeologico nei piccoli bacini montani della regione: esperienze e conoscenze acquisite con il progetto CATCHRISK. Direzione centrale risorse agricole, naturali, forestali e montagna servizio territorio montano e manutenzioni.

Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia (2015) – Progetto di Piano di Tutela delle Acque. Direzione centrale ambiente ed energia.

Reichstein M., Ciais P., Papale D., Valentini R., et al. (2007) - Reduction of ecosystem productivity and respiration during the European summer 2003 climate anomaly: a joint flux tower, remote sensing and modelling analysis. Global Change Biology, vol. 13, 634-651.

Rhein M, Rintoul SR, Aoki S, Campos E, Chambers D, Feely RA, Gulev S, Johnson GC, Josey SA, Kostianoy A, Mauritzen C, Roemmich D, Talley LD, Wang F (2013) – Observations: Ocean; in Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Ed., 1552 pp.

Rixen, C., Schwoerer, C., Wipf, S. (2010) - Winter climate change at different temporal scales in Vaccinium myrtillus, an Arctic and alpine dwarf shrub. *Polar Results*, Vol. 29, 85–94. https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2010.00155.x

Rocca A., Danuso F. (2011) - MiniCSS: software for optimization of crop irrigation and nitrogen fertilization strategies. Italian Journal of Agronomy, 6:e13, 76-83. .

Rojas-Downing M.M., Nejadhashemi A.P., Harrigan T., Woznicki S.A. (2017) Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. Climate Risk Management, Vol.16, 145–163

Romagnoli M., Schirone B. (1992) - Indagini dendroecologiche preliminari sull'abete bianco del bosco Abeti Soprani (Pescopennataro-IS). Annali dell'Accademia Italiana di Scienze Forestali, vol. XXXXI, 3-30.

Rosa R., Marques A., Nunes M.L. (2012) – Impact of climate change in Mediterranean aquaculture. Reviews in aquaculture, Vol. 4, (3), 163–177

Ruddiman W. F:, 2013 - Earth's Climate System Today, in book Earth's Climate: Past and Future (2013), W H Freeman & Co, pp. 445

Rusco E., Filippi N., Marchetti M., Montanarella L. 2003. Carta Ecopedologica d'Italia scala 1:250.000 Relazione divulgativa a cura di: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. EUR 20774 IT, 45, 10 Maps and extended legend. Office of the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Russo A, Rabitti S, Bastianini M (2002) Decadal climatic anomalies in the northern Adriatic Sea inferred from a new oceanographic data set. Marine Ecology Berlin, 23 (1), 340-351.

Salon S., G. Cossarini, S. Libralato, X. Gao, C. Solidoro and F. Giorni, 2008. Downscaling experiment for the lagoon of Venice. Part I: Validation of the present day precipitation climatology. Climate Research, 38, 31-41

Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. (2012) - NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Natural Methods*, Vol. 9, 671–675.

Shipley, B. (2009) - Confirmatory path analysis in a generalized multilevel context. *Ecology*, Vol. 90, 363–368. https://doi.org/10.1890/08-1034.1

Sibilia C. (1952). Conseguenze della persistente siccità dell'ultimo decennio sui nostri boschi. L'Italia Forestale e Montana, vol. VII, 160-167.

Soil Conservation Service (1972) - Section 4: Hydrology; in National Engineering Handbook. SCS.

Solidoro C, Bandelj V, Barbieri P, Cossarini G, Fonda Umani S (2007) Understanding dynamics of biogeochemical properties in the northern Adriatic Sea by using Self-Organizing Maps and k-means clustering. Journal Geophysical Research, 112, C07S90, doi:10.1029/2006JC003553.

Solidoro C, Bastianini M, Bandelj V, Codermatz R, Cossarini G, Melaku Canu D, Ravagnan E, Salon S, Trevisani S (2009) – Current state, scales of variability, and trends of biogeochemical properties in the northern Adriatic Sea, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114, C07S91.

Solidoro C., Del Negro P, Libralato S, Melaku Canu D (ed) (2010) – *Sostenibilità della mitilicoltura triestina*. Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS, Trieste, 88 pp.

Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (2007) Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 996 pp.

Somot S, Sevault F, Déqué M (2006) – Transient climate change scenario of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model. *Climate Dynamics*, Vol. 27, 851–879.

Somot S, Sevault F, Déqué M, Crépon M (2008) – 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere–ocean regional climate model. *Global and Planetary Change*, Vol. 63, 112–126.

Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie S-P (2013) – Technical Summary; in Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Ed., 1552 pp.

Stravisi F, Purga N. (1997) – *La stazione mareografica di Trieste - Porto Lido*. Rapporto N. 60, OM 97/7, Università degli Studi di Trieste, Dipartimento di Scienze della Terra, Trieste, 9 pp.

Supić N, Grbec B, Vilibić I, Ivančić I (2004) – Long-term changes in hydrographic conditions in northern Adriatic and its relationship to hydrological and atmospheric processes. *Annales Geophysicae*, Vol. 22, 733-745.

Thury, M., 1861. Etude Des Glacières Naturelles. Archives des sciences de la bibliothèque universelle, Genève, pp. 1–5.

Torresan S., Critto A., Rizzi J., Marcomini M. (2012) Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the North Adriatic Sea. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12: 2347-2368

Troccoli A, Zambon F, Hodges KI, Marani M (2012) – Storm surge frequency reduction in Venice under climate change. *Climatic Change*, Vol. 113,1065–1079.

Tyree M.T., Zimmermann M.H. (2002) - Xylem Structure and the Ascent of Sap, 2nd Ed. Springer-Verlag.

U.S. Army Corps of Engineers (1956) - *Snow hydrology, summary report of the snow investigations*. In *Technical report*, U.S. Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Portland, Oregon, 1956.

Urli M., Porté A.J., Cochard H., Guengant Y., Burlett R., Delzon S (2013) - Xylem embolism threshold for catastrophic hydraulic failure in angiosperm trees. *Tree Physiology* vol. 33, 672-683.

van Vuuren D., Stehfest E., den Elzen M., Kram T., van Vliet J., Deetman S., Isaac M., Goldewijk K., Hof A., Mendoza Beltran A., Oostenrijk R., van Ruijven B: (2011) - RCP2.6: exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C, Climatic Change (2011) 109:95–116, DOI 10.1007/s10584-011-0152-3

Venturini, C. (2006) - *Evoluzione geologica delle Alpi Carniche. Comune di* Udine - Museo Friulano di Storia Naturale, Udine.

von Arx, G., Edwards, P.J., Dietz, H. (2006) - Evidence for life history changes in high-altitude populations of three perennial forbs. *Ecology*, Vol. 87, 665–674. https://doi.org/10.1890/05-1041

Vousdoukas MI, Voukouvalas E, Annunziato A, Giardino A, Feyen L (2016) – Projections of extreme storm surge levels along Europe. *Climate Dynamics*, Vol. 47, 3171–3190.

Wackernagel, 1998. Splines and kriging with drift. Seminar on Data Spatial Distribution in Meteorology and Climatology. EU Cost 79 publication. Edited by M.Bindi and B. Gozzini. Luxembourg, 1998. pp 57-64.

Walker, M.D., Wahren, C.H., Hollister, R.D., Henry, G.H.R., Ahlquist, L.E., Alatalo, J.M., Bret-Harte, M.S., Calef, M.P., Callaghan, T.V., Carroll, A.B., Epstein, H.E., Jónsdóttir, I.S., Klein, J.A., Magnússon, B., Molau, U., Oberbauer, S.F., Rewa, S.P., Robinson, C.H., Shaver, G.R., Suding, K.N., Thompson, C.C., Tolvanen, A., Totland, Ø., Turner, P.L., Tweedie, C.E., Webber, P.J., Wookey, P.A. (2006) -Plant community responses to experimental warming across the tundra biome. *Proceedings of the Natural Academy of Science*, Vol. 103, 1342–1346. https://doi.org/10.1073/pnas.0503198103

WEO (2017), World Energy Outlook 2017, 2017, Iternational Energy Agency, https://www.iea.org/publications

Wilson, S.D., Nilsson, C. (2009). Arctic alpine vegetation change over 20 years. *Global Change Biology*, Vol. 15, 1676–1684. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01896.x

Woodward, F.I. (1986) - Ecophysiological studies on the shrub Vaccinium myrtillus L. taken from a wide altitudinal range. *Oecologia*, Vol. 70, 580–586. https://doi.org/10.1007/BF00379908

Zanchettin D, Traverso P, Tomasino M (2008) – Po River discharges: a preliminary analysis of a 200-yr time series. *Climatic Change*, Vol. 89, 411-433.

Zentilin A. (2017) Panoramica sui Molluschi Bivalvi in FVG: le risorse del nostro mare tra Sicurezza, Economia e Ambiente. 1st edition Aquafarm, Pordenone

Zerbini S, Raicich F, Prati C, Bruni S, Del Conte S, Errico M, Santi E (2017) – Sea-level change in the Northern Mediterranean Sea from long-period tide gauge time series. *Earth-Science Reviews*, Vol. 167, 72-87.

Zini L., Calligaris C., Treu F., Iervolino D., Lippi F. (a cura di), 2011 – *Risorse idriche sotterranee del Friuli Venezia Giulia: sostenibilità dell'attuale utilizzo*. Edizioni EUT, 89 pp., Trieste, 978-88-8303-314-8.